



Patrícia Cristina Mateus Pimenta

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Argamassas de Cal Aérea e Terra Caulinítica

Caracterização física e química

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues, Professora
Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa

Co-orientador: António Manuel dos Santos Silva, Investigador Auxiliar,
Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Jurí:

Presidente: Professor Doutor Nuno Manuel Guerra

Arguente: Professora Doutora Ana Luísa Velosa

Vogal: Professora Doutora M. Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho de 2014

“Copyright” Patrícia Cristina Mateus Pimenta, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Finalizada esta importante etapa da minha vida reconheço que o trabalho realizado nesta dissertação apenas foi possível com a ajuda de todos os que me acompanharam, aos quais quero expressar o meu sincero agradecimento.

Em Julho de 2013, através da sugestão dada pela professora Paulina, realizei o curso sobre rebocos de terra organizado pela FCT UNL e pela Associação Centro da terra. Este curso incentivou-me a gostar cada vez mais da terra enquanto material de construção e foi uma alavanca preciosa para realizar toda esta caminhada.

Assim, pretendo em primeiro lugar agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Paulina Faria, pela sugestão do tema, por todo o apoio prestado, pelo conhecimento transmitido, pela disponibilidade permanente e simpatia demonstrada ao longo da realização desta dissertação. Desejo que se mantenha com sua gigantesca energia e boa disposição.

Quero agradecer ao Doutor António Santos Silva, co-orientador deste trabalho, pelo apoio incansável, pelo conhecimento transmitido, pelo rigor, frontalidade e simpatia. Obrigada por me ter acolhido no LNEC onde fui sempre apoiada, num ambiente agradável. Gostei muito desta experiência.

Agradeço a ambos os orientadores todas as revisões e sugestões dos textos e conteúdos. Foi uma ajuda fundamental.

À Doutora Idália Gomes, agradeço a disponibilização de alguma bibliografia.

A todas as pessoas tanto na FCT como no LNEC pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao meu padrinho académico, Grilo, a todos os meus amigos dentro e fora da faculdade, eles sabem quem são, que estão sempre presentes para me acompanhar e ajudar em cada etapa.

Por fim, mas acima de todos, agradeço a toda a minha família, especialmente aos meus pais João Carlos e Paula e ao meu mano, João Pedro (um traquinas cheio de energia positiva).

Particularmente aos meus pais, que mostraram ser sempre os melhores do mundo, agradeço o vosso apoio incondicional, estiverem sempre ao meu lado. Ao meu pai quero agradecer por me incentivar a nunca desistir. Lembro-me da nossa conversa sobre a entrada no ensino superior e sobre as minhas dúvidas sobre qual o curso a escolher. Pois bem, já terminei pai. À minha mãe, agradeço a confiança, amizade e valores transmitidos.

RESUMO

Actualmente, a maioria das construções antigas, principalmente as de terra, necessitam de intervenção e as argamassas são muito importantes na reabilitação de edifícios. A terra é um dos materiais de construção mais antigos e os vestígios arqueológicos mostram o seu uso em rebocos, desde as primeiras sociedades agrícolas. Em Portugal, a terra foi, muitas vezes, misturada com cal aérea para formular argamassas de terra e cal. Este tipo de argamassas era aplicado em construções em terra, por exemplo, em paredes de taipa. Apesar de hoje em dia se constatar um crescente interesse pelas argamassas de terra e em particular pelas argamassas mistas, é notória a ausência de conhecimento nesta aérea. É neste contexto que se torna particularmente importante a caracterização deste tipo de argamassas. Para tornar novamente a terra um material de construção, em especial na sua utilização em argamassas compatíveis com alvenaria de terra ou pedra, é necessário otimizar e caracterizar estas argamassas.

No presente estudo, caracterizam-se argamassas de cal aérea e de terra argilosa, a nível físico e a nível químico, no estado endurecido, com 90 dias e 1 ano de idade de cura. As argamassas têm um traço volumétrico de 1:2 (ligante: agregado) com a substituição parcial do ligante (cal aérea) por uma terra argilosa caulinítica. A substituição foi gradual: 10%, 25% e 50% de terra. Para além dos provetes prismáticos, foram ensaiadas argamassas aplicadas sobre suporte de tijolo e em sistema de reboco num murete de taipa. Pela análise de resultados, nomeadamente da evolução do comportamento das argamassas com a idade de cura, constata-se que as argamassas com terra (em geral 25%) melhoram o comportamento face à presença de água, para além das vantagens ambientais que apresentam comparativamente com as argamassas só de cal aérea. Em oposição, verificou-se, ao longo do tempo, uma diminuição da resistência mecânica com o aumento da quantidade de terra introduzido, não comprometendo contudo a utilização das argamassas.

Palavras-chave: cal aérea, terra argilosa, ligante, caracterização, reboco, reabilitação

ABSTRACT

Nowadays, most of old buildings mainly of earth need intervention. The mortars are very important for their rehabilitation. The earth is one of the oldest building materials and archaeological remains show its use in plasters from the earliest agricultural societies. In Portugal the earth was often mixed with air lime to make air lime-earth mortars. This type of mortar was applied in buildings on earth or stone, for example on rammed earth walls. Although nowadays a growing interest is seen for earth mortars and particularly for blended ones, there is a big lack of knowledge on this subject. In this context the need to characterize this type of mortar is emphasized. To use the earth, once more, as a building material, it is necessary to characterize and optimize these mortars which are compatible with earth and stone masonry.

In this research, air lime- clayish earth mortars are characterized on physical and chemical level when hardened, with 90 days and 1year old. The mortars have a volumetric proportion 1:2 (binder: aggregate) with partial replacement of the binder (air lime) by a kaolinitic clayish earth. The replacement was gradual with 10%, 25% and 50% of earth. In addition to the prismatic samples, mortars applied on a brick support and a rendering system on a rammed earth wall were also tested. By analyzing the behavior evolution with age, it is observed that the lime-earth mortars (usually with 25% of earth) improve their behavior towards the presence of water; there are also environmental advantages when compared with the pure air lime mortar. In contrast, there is a decrease in strength over time with the increasing amount of earth; however in limits that do not jeopardize the use of the mortars.

Keywords: air lime, clayish earth, binder, characterization, render, rehabilitation.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objectivos e metodologia.....	2
1.3	Organização da Dissertação	2
2	ESTADO DO CONHECIMENTO.....	5
2.1	A utilização de cal e de terra na construção - contextualização histórica	5
2.2	Argamassas.....	8
2.2.1	Argamassas de Terra	9
2.2.2	Argamassas de Cal	11
2.2.3	Argamassas Mistas de Cal Aérea e Terra.....	11
2.3	Matérias- primas.....	12
2.3.1	Cal aérea.....	12
2.3.2	Reacção de carbonatação em argamassas de cal aérea – O papel da água	13
2.3.3	Terra argilosa.....	14
2.3.4	Agregados.....	18
2.4	Principais reacções químicas que ocorrem nas argamassas de cal aérea e terra	20
2.4.1	Reacção de Carbonatação.....	20
2.4.2	Reacções de Curto e Longo Prazo.....	20
2.4.2.1	Permuta Iónica e Flocculação	21
2.4.2.2	Reacção Pozolânica.....	21
2.5	Argamassas de Substituição – Especificações	22
3	PLANEAMENTO, ARGAMASSAS E PROVETES.....	25
3.1	Introdução à Campanha Experimental	25
3.2	Fases Experimentais.....	25
3.2.1	Produção de Argamassas.....	25
3.2.2	Execução de Provates	26
3.2.3	Condições de Cura.....	26
3.3	Identificação dos Provates.....	26
3.4	Matérias-Primas Utilizadas	27
3.4.1	Cal Aérea.....	27
3.4.2	Terra	29
3.4.3	Agregados.....	31
3.4.4	Fibra Vegetal	33
3.5	Preparação de Argamassas	33

3.5.1	Amassadura	36
3.5.2	Consistência por Espalhamento.....	37
3.6	Execução de Provetes	38
3.6.1	Provetes Prismáticos.....	38
3.6.2	Provetes em Tijolo.....	39
3.6.3	Reboco no murete de taipa	40
3.7	Condições de Cura.....	41
3.7.1	Cura Standard	41
3.7.2	Cura em Ambiente Exterior.....	41
4	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS	43
4.1	Ensaio realizados nos provetes prismáticos	43
4.1.1	Condutibilidade Térmica	45
4.1.2	Massa Volúmica Aparente	46
4.1.3	Módulo de Elasticidade Dinâmico	46
4.1.4	Resistências Mecânicas	47
4.1.4.1	Resistência à tracção por flexão	47
4.1.4.2	Resistência à Compressão	48
4.1.5	Absorção de água por Capilaridade.....	49
4.1.6	Secagem.....	52
4.1.7	Porosidade aberta e massa volúmica	53
4.1.8	Resistência aos sulfatos	55
4.1.9	Porosimetria de Mercúrio	56
4.1.10	Caracterização química e mineralógica.....	58
4.1.10.1	Preparação de Amostras	58
4.1.10.2	Análise Mineralógica por Difracção de Raios X.....	61
4.1.10.3	Análise termogravimétrica e análise termogravimétrica diferencial (TG-dTG) ...	63
4.2	Ensaio realizados sobre provetes em tijolo	64
4.2.1	Dureza superficial por durómetro de Shore A.....	64
4.2.2	Condutibilidade Térmica	64
4.2.3	Velocidade de propagação de ultrassons	65
4.2.4	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten	66
4.2.5	Ensaio de absorção de água por capilaridade e secagem.....	67
4.2.6	Porosimetria por intrusão de Mercúrio.....	70
4.3	Ensaio realizados sobre Reboco no Murete de taipa.....	70

4.3.1	Dureza Superficial por durómetro de Shore-A.....	70
4.3.2	Resistência Superficial por esclerómetro pendular	71
4.3.3	Ensaio de Velocidade de propagação de ultrassons	72
4.3.4	Absorção de Água sob Baixa Pressão- Tubos de Karsten.....	72
4.3.5	Absorção de Água por Capilaridade por Contacto.....	73
4.3.6	Secagem.....	74
4.3.7	Resistência à Compressão com argamassa de confinamento	75
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	77
5.1	Generalidades	77
5.2	Resultados da caracterização das argamassas no estado endurecido.....	77
5.2.1	Provetes prismáticos.....	77
5.2.1.1	Condutibilidade térmica	77
5.2.1.2	Massa volúmica aparente	79
5.2.1.3	Módulo de elasticidade dinâmico	80
5.2.1.4	Resistência à tracção	82
5.2.1.5	Resistência à compressão	85
5.2.1.6	Absorção de água por capilaridade.....	87
5.2.1.7	Secagem.....	90
5.2.1.8	Porosidade aberta e massa volúmica	93
5.2.1.9	Resistência aos sulfatos	96
5.2.1.10	Porosimetria por intrusão de mercúrio	98
5.2.1.11	Caracterização química e mineralógica.....	100
5.2.1	Provetes em tijolo.....	120
5.2.1.1	Dureza superficial por durómetro de Shore A.....	120
5.2.1.2	Condutibilidade térmica	121
5.2.1.3	Velocidade de propagação de ultrassons	121
5.2.1.4	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten	122
5.2.1.5	Ensaio de absorção de água por capilaridade e secagem.....	126
5.2.1.6	Porosimetria por intrusão de mercúrio	129
5.2.1	Argamassas aplicadas sobre o murete de taipa.....	131
5.2.1.1	Dureza superficial por durómetro de Shore A.....	132

5.2.1.2	Resistência superficial por esclerómetro pendular dos rebocos do murete	133
5.2.1.3	Velocidade de propagação dos ultrassons do reboco do murete	135
5.2.1.4	Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten do reboco no murete ...	136
5.2.1.5	Ensaio de Capilaridade por Contacto	139
5.2.1.6	Secagem.....	140
5.2.1.7	Resistência à compressão confinada	142
5.2.1.8	Porosimetria de Mercúrio	142
5.2.1.9	Termografia.....	144
5.3	Síntese dos Resultados Obtidos.....	145
5.4	Comparação de resultados no estado endurecido	149
5.4.1	Propriedades Mecânicas	150
5.4.1	Comportamento face à água	153
5.4.1	Condutibilidade térmica	158
5.4.1	Porosimetria de mercúrio	160
6	CONCLUSÕES	163
6.1	Considerações Finais.....	163
6.2	Principais Conclusões.....	163
6.3	Propostas de desenvolvimento futuro.....	167
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
	ANEXO – DESSIMINAÇÃO PRELIMINAR DE RESULTADOS	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – a) Modelo cristalográfico de uma folha tetraédrica; b) Modelo esquemático de uma folha tetraédrica (adaptada de Murray,2006)	16
Figura 2.2 – a) e b) Modelos esquemáticos de minerais argilas de tripla folha (Tec-Oc-Tec) e respectiva distância foliar , ex: a) montmorilonite e ex: b) elite; c) Modelo esquemático de minerais argilas de dupla folha (Tec-Oc) e respectiva distância foliar ,ex: c) caulinite).	17
Figura 2.3 – Formação de um material cimentício (Cristelo, 2001).....	22
Figura 3.1 – Difratoograma da cal aérea (CL). Notação: P - Portlandite ; C - Calcite.....	28
Figura 3.2 – Curvas termogravimétrica (TG e dTG) da cal aérea.	29
Figura 3.3 – Pormenor da terra argilosa.	29
Figura 3.4 - Curva granulométrica da terra argilosa por via húmida (Gomes et al., 2012d).....	30
Figura 3.5 – Registos difratométricos da amostra terra argilosa (Terra A): A cor vermelha – Refere-se à amostra global; A cor azul – Refere-se à fracção fina (amostra mais concentrada na pasta da argamassa). Notação: M – Mica; K – Caulinite; Q – Quartzo; Go - Goetite; F – Feldspatos; A – Anatase.....	30
Figura 3.6 – Curvas TG e dTG da terra argilosa.	31
Figura 3.7 – Areias APAS12, APAS 20 e APAS 30.....	31
Figura 3.8 – Difratoograma da mistura de areias. Notação: Q – Quartzo; F – Feldspato.	32
Figura 3.9 – Curva granulométrica de cada areia e da mistura de areias (Carneiro, 2012).....	33
Figura 3.10 – Fibra vegetal (casca de arroz).	33
Figura 3.11 – Processo de amassadura: a) pesagem dos constituintes; b) mistura manual dos constituintes; c) misturadora mecânica; d) adição de água (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).....	37
Figura 3.12 – Ensaio de consistência por espalhamento: a) Mesa de espalhamento e molde troncocónico; b) enchimento do molde; c) molde com argamassa após regularização da superfície; d) argamassa após remoção do molde; e) medição do diâmetro do espalhamento (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).	37
Figura 3.13 - Execução de provetes: a) moldes metálicos; b) compactação mecânica; c) nivelamento dos provetes (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).	39
Figura 3.14- Desmoldagem dos provetes prismáticos (Autoria: Naila Jamú e Inês Dias).	39
Figura 3.15 – Execução dos provetes em tijolo: a) aspersão do tijolo já com o molde para a espessura colocado; b) afastador de madeira com 70 cm altura; c) nivelamento da argamassa; d) tijolo após desmoldagem. (autoria Naila Jamú e Inês Dias).	39
Figura 3.16 – a) Murete de taipa; b) murete após aplicação do salpisco; c) acabamento do salpisco ; d) acabamento do reboco final (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).....	40
Figura 3.17 – a) Parque de muretes do DEC/ FCT- UNL; b) murete de taipa com os diferentes painéis de reboco.....	40

Figura 3.18 -	41
Figura 3.19 – a) Sala climatizada; b) provetes em condições de cura na sala climatizada; c) condições de cura na sala climatizada.	41
Figura 4.1 - Esquema da sequência de ensaios realizados aos provetes prismáticos.	44
Figura 4.2 – Medição da condutibilidade térmica em provetes prismáticos.	45
Figura 4.3 – Representação esquemática de um provete prismático com dimensões 40 x 40 x 160 mm ³	46
Figura 4.4 – Equipamento ZEUS Resonance Meter utilizado para determinação do valor de Ed.....	46
Figura 4.5 – Ensaio de resistência à tracção por flexão: a) Equipamento utilizado (ZWICK Z050) b) provete antes da rotura.	48
Figura 4.6 – Ensaio de resistência à compressão: a) Metade provete antes da rotura; b) e c) metade do provete após rotura.	49
Figura 4.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) provete com película aderente; b) colocação dos provetes em caixa de plástico para realização do ensaio; c) visão geral da caixa fechada com os provetes no interior.	50
Figura 4.8 – Curva de absorção de água por capilaridade e cálculo do VA e CC (Grilo, 2013).	51
Figura 4.9 – Evolução da frente húmida nos provetes.	51
Figura 4.10 – Ensaio de Secagem: a) Medição da massa do provete; b) e c) secagem dos provetes. ...	52
Figura 4.11 – Curva de Secagem e Taxa de Secagem (adaptado de Grilo,2013).	53
Figura 4.12 – Ensaio de porosidade aberta: a) exsiccador com sistema com bomba de vácuo ligada; b) disposição dos provetes dentro do exsiccador.	54
Figura 4.13 – Balança de pesagem corrente e pesagem hidrostática; b) provetes sobre pano húmido para retirar o excesso de água; c) acessório e recipiente com água para a pesagem hidrostática.	54
Figura 4.14 – a) Estufa ventilada; b) provetes na estufa ventilada.	55
Figura 4.15 – Ensaio de resistência aos sulfatos: a) provetes imersos em solução de sulfato de anidro; b) perda de massa dos provetes que ficou depositada na rede no fundo da caixa; c) remoção superficial da solução em excesso. É visível a degradação apresentada pelos provetes. ...	56
Figura 4.16 – a) Amostras depois de fragmentadas para terem dimensões adequadas ao penetrómetro; b) conjunto de amostras na estufa ventilada.	57
Figura 4.17 – a) Porosímetro “Autopore IV” da Micometrics; b) introdução da amostra no penetrómetro.	58
Figura 4.18 – Preparação das amostras: a) parcela solta e parcela compacta da mesma amostra; b) esquartelamento da amostra em 8 partes iguais.	59
Figura 4.19 – a) e b) Recolha de quatro partes iguais da amostra para um copo de gobelé; c) provetes na estufa.	59

Figura 4.20 – Preparação da amostra global: a) material utilizado; b) e c) moagem da amostra ; d) identificação e armazenamento da amostra global.....	60
Figura 4.21 – Preparação da fracção fina: a) peneiro de malha 75 µm e copo de gobelé com amostra solta; b) colocação da amostra no peneiro; c) e) fracções resultantes da peneiração; e) identificação e armazenamento da fracção fina.	60
Figura 4.22 – Princípio de funcionamento da Difracção de Raios X (adaptado de Rhodes, 2006).	61
Figura 4.23 – a) Amostra global e fracção fina de cada tipo de amostra; b) material utilizado para preparação de amostras para o ensaio de DRX.	62
Figura 4.24 – a) e b) Enchimento do porta- amostras; c) nivelamento e regularização da superfície do porta-amostras com o auxílio de uma lâmina metálica.	62
Figura 4.25 – a) Introdução da amostra porta-amostras no difractómetro; b) difractómetro Philips PW3710.....	62
Figura 4.26 – Análise termogravimétrica: a) cadinho e pinça; b) colocação do cadinho na termobalança; c) termobalança SETARAM TGA 92.	63
Figura 4.27 – a) Medição com o durómetro de Shore A; b) durómetro.	64
Figura 4.28 – a) Medição da condutibilidade térmica na argamassa aplicada sobre suporte tijolo; b) disposição da medição dos pontos.	65
Figura 4.29 – a) Calibração do aparelho de ultrassons; b) marcação dos pontos a ensaiar; c) disposição dos pontos na argamassa.	66
Figura 4.30 - Ensaio de absorção de água sob baixa pressão em argamassa aplicada no tijolo.....	67
Figura 4.31- Esquema representativo do ensaio de absorção de água por capilaridade do conjunto (argamassa + tijolo).....	68
Figura 4.32- Ensaio de absorção de água por capilaridade no sistema (reboco+ tijolo).	69
Figura 4.33 – Ensaio de secagem na argamassa aplicada sobre suporte de tijolo.	69
Figura 4.34 – Durómetro de Shore A.	71
Figura 4.35 - Ensaio de dureza superficial (esclerómetro pendular).	71
Figura 4.36 – a) Calibração do equipamento de medição de ultrassons; b) realização do ensaio no reboco.....	72
Figura 4.37- a) Tubo de Karsten ; b) tubos de Karsten aplicados no reboco do murete de taipa; c) pormenor do tubo de Karsten e da superfície do reboco após o ensaio.	73
Figura 4.38 - Ensaio de absorção de água por capilaridade por contacto: a) e b) conjunto (cesto +geotêxtil +amostra) no início do ensaio; c) caixa tapada com amostras.	74
Figura 4.39 - a) Balança utilizada no ensaio; b) conjunto (cesto + geotêxtil + amostra) sobre 2 ripas de vidro numa bancada da sala climatizada; c) ensaio de secagem de todas as amostras.	75
Figura 4.40 – Ensaio de compressão confinada.	76
Figura 5.1 - Evolução da condutibilidade térmica dos provetes prismáticos aos 90 dias e 180 dias/ 1 ano.....	78

Figura 5.2 - Evolução com a idade da massa volúmica aparente em provetes prismáticos.	80
Figura 5.3 - Evolução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas dos provetes prismáticos aos 90 dias e 180 dias/ 1 ano.....	81
Figura 5.4 - Evolução da resistência à tracção das argamassas dos provetes prismáticas aos 90 dias e 180dias/ 1 ano de idade.	83
Figura 5.5 - Resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias.....	84
Figura 5.6 - Resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico aos 180 dias/1 ano.	84
Figura 5.7 - Evolução da resistência à compressão das argamassas dos provetes prismáticas aos 90 dias e 180dias/ 1 ano de idade.	86
Figura 5.8 - Resistência à compressão e tracção aos 90 dias nos provetes prismáticos.	86
Figura 5.9 - Resistência à tracção e compressão aos 180 dias / 1ano nos provetes prismáticos.	86
Figura 5.10 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias.	87
Figura 5.11 - Resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico aos 180dias/ 1ano.....	87
Figura 5.12 - Curvas de capilaridade de todas as argamassas aos 90 dias	88
Figura 5.13 - Curvas de capilaridade de todas a argamassas (aos 180 dias para as argamassas com fibras e a 1 ano para as restantes).	89
Figura 5.14 - Evolução do coeficiente de capilaridade de todas as argamassas nos provetes prismáticos.	89
Figura 5.15 - Evolução do valor assintótico de todas as argamassas nos provetes prismáticos.....	90
Figura 5.16 - Curvas de secagem de todas as argamassas aos 90 dias.	91
Figura 5.17 - Curvas de secagem de todas a argamassas (aos 180 dias para as argamassas com fibras e a 1 ano para as restantes).	92
Figura 5.18 - Evolução da taxa de secagem de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias/1 ano.	92
Figura 5.19 - Evolução do índice de secagem de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias / 1ano.	93
Figura 5.20 - Porosidade aberta de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias/ 1ano.	94
Figura 5.21 – Massa volúmica de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias /1 ano.	95
Figura 5.22 - Porosidade aberta e massa volúmica nos provetes prismáticos com 90 dias.....	96
Figura 5.23 - Porosidade aberta e massa volúmica nos provetes prismáticos com 180 dias/ 1 ano.	96
Figura 5.24 - Resistência aos sulfatos de todas as argamassas aos 90 dias.....	97
Figura 5.25 - Resistência aos sulfatos de todas as argamassas (aos 180 dias para as argamassas com fibras e a 1 ano para as restantes).	98
Figura 5.26 - Distribuição do tamanho de poros por intrusão de mercúrio (90 dias e 1 ano).	99
Figura 5.27 - Evolução da porosidade aberta (porosimetria de mercúrio) das argamassas dos provetes prismáticos.....	100
Figura 5.28 - Difratoograma da terra argilosa e da cal aérea. Notação: C - Caulinite; P - Portlandite; 102	

Figura 5.29 - Difrátogramas da argamassa de referência (CL2) aos 90 dias e 1 ano de idade: a) amostra global; b) fracção fina.....	103
Figura 5.30 - Difrátogramas das argamassas CL2 e CL2_10t : a) amostras globais das argamassas CL2 e CL2_10t à idade dos 90 dias; b) amostras globais da argamassa CL2_10t às idades de 90 dias e 1 ano; c) fracções finas da argamassa CL2_10t às idades de 90 dias e 1 ano.....	104
Figura 5.31 - Difrátogramas das argamassas CL2_10t e CL2_25t : a) amostras globais das argamassas CL2_10t e CL2_25t à idade dos 90 dias; b) amostras globais da argamassa CL2_25t às idades de 90 dias e 1 ano; c) fracções finas da argamassa CL2_25t às idades de 90 dias e 1 ano.....	105
Figura 5.32 - Difrátogramas da argamassa CL2_25t com e sem adição de fibras vegetais (dosagem máxima) : a) amostra global da argamassa com 25% de terra com e sem adição de fibras; b) amostra global da argamassa com adição de fibras aos 90 e 180 dias de idade; c) Fracção fina e amostra global da argamassa com adição de fibras aos 180 dias.	106
Figura 5.33 - Difrátogramas das argamassas CL2_25t com (dosagem mínima) e sem fibras aos 90 dias e 180 dias : a) amostras globais aos 90 dias; b) amostras globais aos 90 e 180 dias da argamassa com fibras; c) fracções finas aos 90 e 180 dias da argamassa com fibras.	107
Figura 5.34 - Difrátogramas das argamassas CL2_25t e CL2_50t ; a) amostras globais das argamassas CL2_25t e CL2_50t aos 90 dias; b) amostras globais da argamassa CL2_50t aos 90 dias e 1 ano de idade; c) fracções finas da argamassa CL2_50t aos 90 dias e 1 ano de idade.....	108
Figura 5.35 - Curvas TG e DTG dos ligantes usados nas argamassas: a) terra caulinítica; b) cal aérea hidratada.	111
Figura 5.36 - Curvas de DTG de todas as argamassas: a) 90 dias ; b) 180 dias para as argamassas com fibras e 1 ano para as restantes.	112
Figura 5.37 - Evolução do teor de Ca(OH)_2 livre nas argamassas.	119
Figura 5.38 - Teor de CaCO_3 nas argamassas.	119
Figura 5.39 - Evolução da dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas em suporte de tijolo.....	120
Figura 5.40 - Evolução da condutibilidade térmica nas argamassas aplicadas sobre tijolo.	121
Figura 5.41 - Evolução da velocidade de propagação de ultrassons nas argamassas aplicadas sobre tijolo.	122
Figura 5.42 - Quantidade de água absorvida aos 90 dias e 1 ano de idade de cura das argamassas aplicadas sobre tijolo.....	123
Figura 5.43 - Tempo necessário para absorver 4ml de água no reboco aplicado sobre o tijolo aos 90 dias e 1 ano de idade de cura.....	124
Figura 5.44 - Evolução dos coeficientes de absorção de água aos 5 minutos de ensaio nos provetes em tijolo.	125

Figura 5.45 - Aspecto do revestimento do tijolo após ensaio de absorção de água por capilaridade: a) altura a que a água atingiu no tijolo e na argamassa; b) frente húmida no revestimento.	126
Figura 5.46 - Evolução da absorção de água por capilaridade nas argamassas aplicadas sobre suporte de tijolo com 1 ano de idade de cura.	127
Figura 5.47 - Coeficientes de capilaridade das argamassas aplicadas sobre suporte de tijolo.	128
Figura 5.48 - Curvas de secagem no reboco aplicada no tijolo durante 24 h de ensaio.	128
Figura 5.49 - TS do reboco aplicado sobre tijolo.	129
Figura 5.50 - Distribuição do tamanho de poros (por intrusão de mercúrio) das argamassas aplicadas em suporte de tijolo (90 dias e 1 ano de idade de cura).	130
Figura 5.51 - Evolução da porosidade aberta (por porosimetria de mercúrio) nos provetes em suporte de tijolo.	131
Figura 5.52 - Pannel da argamassa de referência só de cal abatido	132
Figura 5.53 - Precipitação mensal ao longo do mês de Janeiro de 2014.	132
Figura 5.54 - Dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas em muretes de taipa aos 90 dias e 1 ano.	133
Figura 5.55 - Valores da dureza superficial na base, a meia altura e no topo de argamassas aplicadas em muretes de taipa.	133
Figura 5.56 - Valores médios da resistência superficial das argamassas aplicadas no murete de taipa aos 90 dias e 1 ano.	134
Figura 5.57 - Dureza superficial do reboco do murete com 1 ano. Medição realizada a 3 níveis no murete: base, parte intermédia e topo.	134
Figura 5.58 - Velocidade de propagação de ultrassons no reboco do murete de taipa com 90 dias e 1 ano.	135
Figura 5.59 - Velocidade de propagação de ultrassons no reboco aplicado no murete de taipa com 1 ano. O ensaio foi realizado em três níveis do murete (base, parte intermédia e topo).	135
Figura 5.60 - Absorção de água sob baixa pressão dos rebocos de argamassa aplicadas no murete de taipa, aos 90 dias.	136
Figura 5.61 - Absorção de água sob baixa pressão dos rebocos de argamassa aplicadas no murete de taipa, com 1 ano de idade de cura.	137
Figura 5.62 - Absorção de água sob baixa pressão em amostras recolhidas do pannel de taipa com 1 ano de idade de cura.	137
Figura 5.63 - a) Amostra de reboco do pannel CL2; b) plasticina (considerada estanque) utilizada no ensaio com os tubos de Karsten c) ensaio com tubo de Karsten realizado na amostra de reboco recolhida do murete; d) ensaio com o tubo de Karsten realizado no murete.	138
Figura 5.64 - Coeficiente de absorção de água após 5 minutos de ensaio no reboco aplicado no murete de taipa com 1 ano de idade de cura.	138

Figura 5.65 - Evolução da absorção de água por capilaridade nas argamassas recolhidas do murete de taipa com 1 ano de idade.	139
Figura 5.66 - Curva de secagem (reboco recolhido do murete de taipa).	140
Figura 5.67 - Taxa de secagem e índice de secagem no reboco recolhido do murete de taipa.	141
Figura 5.68 - Distribuição do tamanho de poros por intrusão de mercúrio do reboco aplicado no murete de taipa. (90 dias e 1 ano).	143
Figura 5.69 - Evolução da porosidade aberta (por porosimetria de mercúrio) nos provetes em suporte de tijolo.	144
Figura 5.70 - Termogramas do reboco do murete de taipa : A2- antes do abatimento do painel de extremidade esquerdo com argamassa CL2; B2-após o abatimento do painel ;A1 e B1- fotografias do murete.	145
Figura 5.71 - Resistência à compressão, resistência à tração das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra P- identifica os provetes prismáticos e a letra M - identifica argamassas recolhidas do murete de taipa).	150
Figura 5.72 - Relação E_d/R_t e módulo de elasticidade dinâmico dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.	151
Figura 5.73 - Resistência à compressão e resistência aos sulfatos ao 20 ^a ciclo (provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura).	152
Figura 5.74- Resistência à compressão e massa volúmica (pelo método geométrico) dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.	152
Figura 5.75 - Coeficiente de capilaridade (CC) e taxa de secagem (TS) dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.	153
Figura 5.76 - Valor assintótico (VA) e índice de secagem (IS) das argamassas nos provetes prismáticos com 1 ano de idade.	154
Figura 5.77 - Valor assintótico e porosidade aberta (pelo método hidrostático) das argamassas nos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.	155
Figura 5.78 - Coeficiente de capilaridade das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra P- identifica os provetes prismáticos e a letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).	156
Figura 5.79 - Coeficiente de capilaridade das argamassas com 1 ano de idade de cura aplicadas em dois suportes diferentes (letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo e a letra M- identifica argamassas recolhidas do murete de taipa).	157
Figura 5.80 - Taxa de secagem das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra P- identifica os provetes prismáticos e a letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).	157
Figura 5.81 - Taxa de secagem das argamassas com 1 ano de idade de cura aplicadas em dois suportes diferentes (letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo e a letra M- identifica argamassas recolhidas do murete de taipa).	158

Figura 5.82 - Condutibilidade térmica das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra P- identifica os provetes prismáticos e a letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).	159
Figura 5.83 - Velocidade de propagação de ultrassons e condutibilidade térmica das argamassas com 1 ano de idade de cura letra (T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).....	159
Figura 5.84 - Distribuição do tamanho dos poros (por intrusão de mercúrio) argamassa CL2 com 1 ano de idade (letra P - identifica provete prismático; a letra T - refere-se ao provete em suporte de tijolo e a letra M - identifica as argamassa recolhida do murete de taipa).	160
Figura 5.85 - Distribuição do tamanho dos poros (por intrusão de mercúrio) da argamassa CL2_25t com 1 ano de idade (letra P - identifica provete prismático; a letra T - refere-se ao proвете em suporte de tijolo e a letra M - identifica as argamassa recolhida do murete de taipa). 161	161

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico de terra compactada e de argamassas de terra - informação de Góris (2008), consultado em Röhlen e Ziegert (2011).	9
Quadro 2.2 – Gama de valores sugeridos para argamassas de substituição e refechamento de juntas aos 90 dias para edifícios antigos (adaptado de Veiga et al., 2010.....	23
Quadro 3.1 – Identificação das argamassas, tipo de cura e suporte em que estão aplicadas	27
Quadro 3.2 – Composição química de cal aérea (% de massa) (Gameiro et al., 2014).....	27
Quadro 3.3 – Baridade dos constituintes das argamassas (Carneiro, 2012; Jamú, 2013; Santos, 2014)	28
Quadro 3.4 – Série de peneiros utilizada para a peneiração mecânica (adaptado de Massena, 2011).	32
Quadro 3.5 – Identificação dos provetes (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014)	35
Quadro 3.6 – Dosagem dos constituintes das argamassas (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014).....	35
Quadro 3.7 – Traço ponderal e volumétrico das argamassas (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014)	36
Quadro 3.8 – Consistência por espalhamento de todas as argamassas (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014).....	38
Quadro 4.1- Ensaio de caracterização realizados sobre os rebocos	70
Quadro 4.2 – Síntese dos ensaios realizados nos prismas	76
Quadro 4.3 – Síntese dos ensaios realizados nas argamassas aplicadas sobre o tijolo e no reboco do murete de taipa	76
Quadro 5.1 - Valores médios e desvios padrão da condutibilidade térmica.....	78
Quadro 5.2 – Massa volúmica aparente dos provetes prismáticos	79
Quadro 5.3 - Valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico.....	81
Quadro 5.4 - Valores médios e desvio padrão da resistência à tracção	83
Quadro 5.5 - Valores médios e desvio padrão da resistência à compressão	85
Quadro 5.6 - Valores médios e desvio padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico ...	88
Quadro 5.7 - Valores médios e desvio padrão da taxa de secagem e índice de secagem.....	91
Quadro 5.8 - Valores médios e desvios padrão dos valores de porosidade aberta e massa volúmica pelo método hidrostático	94
Quadro 5.9 – Compostos cristalinos identificados e notação utilizada	101
Quadro 5.10 - Composição mineralógica qualitativa das argamassas a diferentes idades	109
Quadro 5.11 - Perdas de massa analisadas	111
Quadro 5.12 – Perda de massa na terra	113
Quadro 5.13 – Perda de massa na cal	114
Quadro 5.14 - Teor de portlandite livre nas argamassas	118

Quadro 5.15- Teor de calcite nas argamassas	119
Quadro 5.16 - Coeficiente de capilaridade aos 5 min de ensaio e valor assintótico nas argamassas recolhidas do murete de taipa com 1 ano de idade de cura.	140
Quadro 5.17 - Valores médios e desvio padrão da taxa de secagem e índice de secagem do reboco recolhido do murete de taipa com 1 ano de idade de cura.....	141
Quadro 5.18 - Valores médios e desvio padrão da resistência à compressão confinada de amostras de reboco retiradas do painel de taipa com 1 ano de idade de cura.....	142
Quadro 5.19 - Resumo dos principais resultados obtidos nos provetes prismáticos (90 dias e 1 ano de idade de cura).	146
Quadro 5.20- Resumos dos principais resultados obtidos as argamassam aplicadas sobre tijolo e sobre o murete de taipa.....	147
Quadro 5.21 - Análise global dos resultados dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura..	148
Quadro 5.22 - Análise global dos resultados dos provetes em tijolo com 1 ano de idade de cura.....	148
Quadro 5.23 - Análise global dos resultados do reboco do murete de taipa com 1 ano de idade de cura.....	149

Simbologia

Abreviaturas

- CEN – Comité Européen de Normalisation.
- DEC – Departamento de Engenharia Civil.
- EN – European Norm.
- FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- IPQ – Instituto Português da Qualidade, I.P.
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- NP – Norma Portuguesa.

Argamassas

- CL2 – argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:2.
- CL2_10t(L) – argamassa de cal aérea e areia com base no traço volumétrico 1:2, com substituição de 10% de massa de cal aérea por terra argilosa.
- CL2_25t(L) – argamassa de cal aérea e areia com base no traço volumétrico 1:2, com substituição de 25% de massa de cal aérea por terra argilosa.
- CL2_50t(L) – argamassa de cal aérea e areia com base no traço volumétrico 1:2, com substituição de 50% de massa de cal aérea por terra argilosa.
- CL3 – Argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:3 de referência, ou seja, sem qualquer terra.
- CL3_10t(ArF) - Argamassa de cal aérea e areia ao traço 1:3, com 10% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina.

Ensaio e determinações

- λ - Condutibilidade térmica.
- MV - Massa volúmica.
- Ed - Módulo de elasticidade dinâmico.
- Rt - Resistência à tracção por flexão.
- Rc - Resistência à compressão.
- CC - Coeficiente de absorção de água por capilaridade.
- VA - Valor assintótico de absorção capilar.
- TS - Taxa de secagem.
- IS - Índice de secagem.

-
- Pab - Porosidade aberta.
 - Δm 20°C - Perda de massa face à cação dos sulfatos ao 20°C.
 - DS - Dureza superficial.
 - Vus - Velocidade de propagação de ultrassons.
 - RS - Resistência superficial.
 - DRX - Difraccção de raios X.
 - TG- Análise termogravimétrica.
 - dTG- Derivada da curva TG (análise termogravimétrica diferencial).

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Na actualidade, é notória uma maior consciencialização em relação à conservação do património e, simultaneamente, ao impacto ambiental causado pela construção. De facto, são cada vez mais evidentes os esforços com vista à escolha de materiais ecológicos e sustentáveis. A terra é um dos materiais de construção mais antigos e os vestígios arqueológicos mostram o seu uso em rebocos e tijolos, desde as primeiras sociedades agrícolas. Em Portugal, existe um património de construções em terra rico e de excelência, nomeadamente no Alentejo, onde é possível encontrar muitas edificações em terra compactada (taipa). O Castelo de Alcácer do Sal é um exemplo da construção em terra que existe em Portugal (Fernandes, 2012). Em toda a zona de Aveiro já é corrente a alvenaria de adobe (Gomes, 2013; Velosa e Veiga, 2007). Também a nível internacional existe um vasto património de construções em terra, desde complexas estruturas até às simples edificações que necessitam de conservação. As construções em terra correspondem a 10% do património mundial da UNESCO (Balderrama, 2001). A terra, para além de ser material ecológico, apresenta uma grande durabilidade, mas as construções onde é aplicada necessitam de manutenção. A periodicidade da manutenção destas construções é variável, de construção para construção, e está intimamente relacionada com o tipo de protecção que possuem e com os agentes atmosféricos a que estas estão sujeitas.

É frequente encontrar construções em terra compactada reparadas com argamassas à base de cimento, na tentativa de combater a degradação. Contudo, estas argamassas acabam por trazer problemas adicionais. As argamassas de cimento são, muitas vezes, demasiado rígidas e muito impermeáveis à água, contribuindo para a degradação do suporte (Mosquera et al. 2006; Faria-Rodrigues, 2009). É, assim, importante escolher argamassas com propriedades semelhantes às das alvenarias nas quais irão ser aplicadas. Só desta forma é possível conservar o património a legar às gerações futuras. Com efeito, as argamassas para a conservação devem apresentar uma boa compatibilidade mecânica, física e química com as alvenarias. Simultaneamente, as suas características necessitam de ser suficientes para resistir à sua própria degradação (Henriques e Faria, 2006; Faria et al., 2008). Todavia, nem sempre os vários requisitos exigidos às argamassas são fáceis de atingir e harmonizar. Em Portugal, a terra foi, frequentemente, misturada com cal aérea para formular argamassas de terra e cal. Este tipo de argamassas era aplicado em construções em terra, nomeadamente em paredes de taipa e alvenaria de adobe ou mesmo em alvenaria de pedra (Faria et al., 2013; Faria et al., 2014).

Actualmente, por todo o mundo existe um crescente interesse por construções em terra. Em Portugal, nomeadamente no Alentejo, existe um aumento do número de construções novas e de reabilitação de construções existentes, não só de habitações familiares, como também de edificações relacionadas com o turismo. Assim sendo, para tornar a terra um material de construção é necessário caracterizar bem este material e os produtos de construção que resultam da sua utilização. Neste contexto, a presente dissertação pretende contribuir para um melhor conhecimento das argamassas mistas de cal aérea e terra. É notória a escassa informação que existe sobre estas argamassas mistas. Não só as características físicas e mecânicas

são relevantes, mas também as características químicas e mineralógicas. Assim, o conhecimento do tipo de minerais de argila presente na terra é um factor preponderante para as características das argamassas.

Esta dissertação surge no seguimento de três trabalhos realizados anteriormente, por Jamú (2013), Dias (2013) e Santos (2014), e insere-se assim num estudo cuja linha de investigação pretende contribuir para um maior conhecimento relativamente às argamassas mistas de cal aérea e terra. Encontra-se enquadrada no âmbito do projecto exploratório financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia EXPL/ECM-COM/0928/2012 - Incorporação de resíduos de cerâmica em argamassas de reabilitação, contribuindo para a comparação das características de argamassas de cal aérea com resíduos de cerâmica (com base em argila sujeita a tratamento térmico) e com terra (argila crua).

1.2 Objectivos e metodologia

O presente estudo tem como objectivo geral contribuir para um melhor conhecimento das características físico-mecânicas e químico-mineralógicas das argamassas mistas de cal aérea e terra. Para tal foi executada uma campanha experimental de forma a caracterizar provetes prismáticos de argamassas, mas também argamassas aplicadas sobre tijolo cerâmico e rebocos com as mesmas argamassas aplicados sobre um murete de taipa. O desempenho das argamassas foi acompanhado com a evolução da idade de cura.

Em termos de metodologia procedeu-se na presente dissertação a:

- Análise das características físicas, mecânicas, mineralógicas e químicas das argamassas de cal aérea com incorporação de terra argilosa dos 90 dias ao 1 ano de idade;
- Avaliação do comportamento das argamassas nos diferentes suportes onde é aplicado: sobre suporte de tijolo e, em sistema de reboco, sobre murete de taipa;
- Determinação dos compostos formados em cada argamassa e identificação da sua influência no comportamento físico e mecânico.

1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação foi dividida em 8 capítulos. A bibliografia e os anexos constituem capítulos independentes.

Capítulo 1 – Introdução – inclui o enquadramento do tema, os objectivos que se pretendem atingir com este trabalho e a organização da dissertação;

Capítulo 2 – Estado do Conhecimento- abrange a bibliografia pesquisada, dividida por tópicos relacionados com o contexto histórico em que ocorre a utilização da terra na construção, as argamassas estudadas e as características dos principais tipos de minerais de argila que podem estar presentes na terra, bem como as principais reacções que podem ocorrer entre a cal e os minerais de argila;

Capítulo 3 – Plano da campanha experimental – identifica o tipo de provetes que vão ser caracterizados ao longo da dissertação, bem como os ensaios experimentais que serão realizados;

Capítulo 4 – Fabrico de argamassas e provetes – aborda os materiais utilizados e os procedimentos de execução de provetes;

Capítulo 5 – Procedimentos de ensaios realizados nas argamassas – apresenta os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido, aplicadas nos suportes de tijolo, de taipa e nos provetes prismáticos;

Capítulo 6 – Apresentação e discussão dos resultados obtidos – compreende a apresentação dos resultados obtidos, bem como uma discussão cuidada dos mesmos, a que se seguirá uma análise global, no final do capítulo;

Capítulo 7 – Conclusões – apresenta uma síntese das principais conclusões, a partir do trabalho realizado, dando resposta aos objectivos propostos, e algumas propostas de desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 A utilização de cal e de terra na construção - contextualização histórica

Com a sedentarização, surgiu um dos problemas essenciais do Homem: a construção de abrigos estáveis e duradouros, que permitissem a sua defesa e abrigo. Era necessário encontrar na natureza materiais estáveis, duradouros e em abundância com os quais os homens pudessem construir os seus abrigos. A terra reunia as características necessárias para esse fim, existia em abundância, em qualquer lugar, e adaptava-se a inúmeras construções.

Ao longo da História, a utilização da terra como material de construção manteve-se sempre constante. Mesmo em zonas onde existiam outros materiais, tais como a pedra, por vezes devido aos elevados custos associados à sua extracção e ao seu transporte, incentivaram o uso da terra como material de construção (Faria e Henriques, 2005). A terra é um dos materiais de construção mais antigos e os vestígios arqueológicos mostram que o seu uso remonta às primeiras sociedades agrícolas (Bruno et al., 2010; Pacheco-Torgal e Jalali, 2012), embora outros autores, tais como Minke (2006), localizem cronologicamente a sua utilização como material de construção há cerca de 9000 anos.

Com o conhecimento adquirido pela prática constante da utilização deste material, foi possível descobrir novas formas e sistemas construtivos que acabaram por resultar em variadíssimas construções, hoje consideradas emblemáticas em todo o mundo. Existem inúmeros exemplos destas construções em terra espalhadas por todos os continentes: a mediática Muralha da China, cujo início de construção data de há 3000 anos, que apresenta secções bastante extensas construídas com terra compactada (Pacheco-Torgal e Jalali, 2012); as ruínas da cidade de Chanchán, no Peru, que são das mais antigas construções de terra (Alexandra, 2006); o templo de Horyuji, no Japão, que também foi construído com paredes de terra há 1300 anos (Jaquin, 2008) e ainda, Shibam, no Iémen, cidade onde é possível encontrar edifícios em terra, que possuem até 11 andares, construídos há 100 anos (Helfritz, 1936, consultado em Pacheco-Torgal e Jalali, 2012).

A terra tem sido utilizada, ao longo da História, como material construtivo por excelência, quer na edificação de monumentos, quer na construção de habitações. Embora tenha cedido, gradualmente, lugar a outros materiais, nunca deixou de ser utilizada. Hoje é, fundamentalmente, utilizada nos países em desenvolvimento (Hamard et al., 2013), mas em diversos países desenvolvidos o interesse por este material ganhou interesse devido a questões técnicas mas particularmente ecológicas e ao nível da sustentabilidade.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos estima que mais de metade da população mundial habite em casas construídas em terra (Cancino, 2008). Porém, também nos países industrializados se encontram inúmeros indícios deste tipo de construção. Em França, em 1987, existia cerca de um milhão de construções em terra; segundo Michel e Poudru (1987), as construções em terra, que incluíam taipa, adobe e terra empilhada, tinham uma idade mínima de 50 anos e uma idade

média de 100 anos. No Reino-Unido, existem cerca de 500 000 habitações em terra (Houben et al.,2008).

Em Portugal, a construção em terra foi impulsionada nos finais do século XIX (Varum et al., 2005), com alguma variação regional. No sul, predomina a taipa, e no litoral – bacias dos rios Mira e Sado, destaca-se o uso da alvenaria de adobe (Torres, 2005). Nos últimos anos, o número de construções novas em terra compactada tem vindo a aumentar, tal como o número de edifícios antigos a serem reabilitados para utilizações modernas.

Segundo The Earthen Architecture Initiative, pertencente ao Getty Conservation Institute, 10% dos locais de herança mundial da UNESCO são locais com construção em terra, mas cerca de 57% desses locais estão em perigo. Assim, está-se perante uma herança arquitectónica rica e igualmente complexa, pelo que é extremamente importante preservá-la. Nesse sentido, países com diferentes estatutos económicos e culturais estão a disponibilizar esforços para proteger este tipo de construção, muito devido ao crescente interesse pela construção sustentável. Neste contexto, e segundo Pacheco-Torgal e Jalali (2012), na última década, quase 100 artigos foram publicados em jornais/revistas científicas sobre técnicas de construção sustentáveis, e maioritariamente relacionados com terra compactada, revelando os esforços que têm sido desenvolvidos na investigação por académicos, engenheiros e arquitectos, unidos por um interesse comum, o de preservar a arquitectura de terra e fomentar o interesse pela nova construção com recurso a este material. É, portanto, grande a diversidade de profissionais que reconhece não só as fragilidades das construções em terra, mas também as suas grandes potencialidades e vantagens.

Como o conhecimento empírico da construção em terra se está a esvanecer, em muitos países foram produzidos documentos normativos sobre este tipo de construção (Gomes et al., 2014). Desses destacam-se: Alemanha (Schroeder et al.,2008), Austrália (Maniatidis et al., 2003), Zimbabué (Alexandra, 2006) e Nova Zelândia (Keable, 1996).

Entre as técnicas de construção em terra, a taipa é uma das mais importantes, tanto ao nível da construção tradicional, como ao nível da arquitectura moderna. Contudo, a degradação da superfície exterior das paredes de taipa é muito comum. Esta deterioração é provocada pela falta de manutenção, pela exposição directa às intempéries e também pela aplicação de materiais incompatíveis (Gomes et al.,2013)

A durabilidade que estas construções apresentam é naturalmente comprovada pelo facto de alguns edifícios construídos há centenas de anos ainda existirem. Uma das potencialidades com destaque deste tipo de construções é, sem dúvida, o facto de terem um bom desempenho térmico. Estudos realizados nos Estados Unidos da América revelaram que paredes de terra com 60 cm de espessura apresentavam o dobro do isolamento térmico requerido nos regulamentos deste país (Goodhew, 2005).

Os edifícios actuais têm uma quantidade significativa de toxicidade causada pelo uso de químicos e metais pesados que contaminam o ar interior dos edifícios, com consequências graves para

a saúde humana, já que estes causam várias doenças, nomeadamente a asma. Por seu turno, as construções de terra estão desassociadas destes efeitos nefastos, apresentando mesmo um comportamento benéfico para a saúde. São diversos os autores que afirmam que existe uma melhor qualidade do ar interior proporcionada por construções e argamassas de terra. Segundo Wargocki et al.(1999) e Lima (2013) a terra utilizada como material de construção ajuda a equilibrar a humidade relativa, porque absorve vapor de água quando o ar se encontra mais húmido, e o contrário, quando o ar está mais seco. Para além de todos os factos acima mencionados, estas construções são competitivas ao nível de sustentabilidade, uma vez que a terra é um material abundante na natureza e é, portanto, ecológico. Inclusive, quando a construção em terra é realizada com materiais locais, não existem gastos associados ao transporte, nem poluição provocada por este.

De acordo com The Earthen Architecture Initiative, pertencente ao Getty Conservation Institute (Getty, 2014), existem alguns estigmas em relação à construção em terra, nomeadamente o facto de ser considerada obsoleta e vulnerável aos sismos. Contudo, de acordo com a mesma fonte bibliográfica, estas críticas poderão ser inadequadas, pelo facto de este tipo de construções terem perdurado durante alguns séculos em zonas sísmicas. Em Lima (Peru), onde os sismos têm feito parte da história da cidade, foram usadas paredes espessas de adobe, para os primeiros andares, e paredes de terra com estrutura em madeira muito flexíveis, para os segundos andares. Assim, esta simbiose de técnicas permitiu que edifícios históricos sobrevivessem a sismos durante mais de 300 anos, o que demonstra uma boa resistência deste tipo de construções às acções sísmicas. Porém, estas construções também têm as suas limitações. Shittu (2008) menciona algumas restrições, nomeadamente a falta de mão-de-obra qualificada e a ausência de cursos relacionados com a terra. Existe, assim, falta de treino adequado e de normas específicas. O facto do conhecimento dos pedreiros relativamente a esta arte de construção não ser transmitida às gerações seguintes leva a que esta tenha vindo a cair em desuso. É, então, importante continuar a criar regulamentações específicas para construção com recurso à terra.

A necessidade de preservar as construções de terra existentes torna fundamental intervir de forma consciente e informada, de modo a não agravar as anomalias existentes. Apesar de a terra ser um material de construção de grande durabilidade, carece de manutenção onde quer que seja aplicada. Evita-se, assim, o aparecimento de sinais de degradação. Só desta forma é possível legar o património às gerações futuras.

Deste modo, quer na reabilitação, quer na construção nova com terra (taipa, adobe ou blocos de terra comprimida) é necessário utilizar argamassas compatíveis com o suporte, à semelhança da arquitectura vernacular portuguesa. Argamassas de terra devem ser usadas no interior e argamassas de cal ou cal e terra devem ser utilizadas para reboco exterior da alvenaria de terra (Faria e Henriques, 2005).

Segundo Malinowsky (1991), depois da pedra, da terra, da madeira, do gesso, a cal é um dos materiais mais antigos usados na construção. As primeiras utilizações de cal datam do Paleolítico, pelo

que as primeiras utilizações se situam no mesmo contexto temporal da utilização do fogo (Malinowsky, 1991 consultado em Margalha, 2010).

O uso de ligantes aéreos remonta a um período anterior à civilização egípcia. Eram misturados ligantes aéreos, nomeadamente cal aérea com gesso, cuja finalidade era facilitar o deslocamento de blocos de grandes dimensões, ou seja, tinha o papel de lubrificante (Bentur, 2002).

A Grécia foi pioneira na utilização de cal em argamassas de revestimento, essencialmente em estuques pintados (Adam, 1989 consultado em Margalha, 2010). A civilização grega foi também pioneira na adição de areias nas argamassas de cal.

No sul de Portugal, o uso de cal no revestimento de paredes é proveniente do período de ocupação muçulmana (Margalha, 2010). Tinha como utilização a caiação das paredes de cor branca e era usada em certas argamassas. Em algumas aldeias, nomeadamente no Alentejo, a tradição de caiar ainda se mantém, sendo utilizada desde o período de ocupação muçulmana. É um material localmente disponível e simultaneamente com boas características (Elert et al., 2002). As argamassas de cal contribuem para a durabilidade e conservação de alvenarias antigas de edifícios históricos, uma vez que admitem deformações provocadas por carregamentos. Com efeito, apesar da variedade de ligantes existentes, a cal é um dos mais usados há mais tempo pelo Homem (Hansen et al., 2007).

Com a descoberta do cimento, no início do século XIX, verificou-se uma diminuição do uso de argamassas tradicionais, dando lugar ao uso de argamassas de cimento. Contudo, no Alentejo, apenas nos anos 50-60 do século XX se verificou uma expansão do uso de argamassas de cimento (Margalha, 1997). Este facto é justificado pelas suas propriedades, ou seja, a sua grande resistência, adquirida em poucos dias. Apesar das suas qualidades inquestionáveis para determinados tipos de aplicação, em alvenarias antigas a sua aplicação é ineficiente e mesmo desaconselhável. Na reabilitação de edifícios antigos deve ser prescrito o uso de materiais o mais similares possível aos existentes (Torraca, 1998).

Actualmente, há consciência das anomalias causadas pelo uso de argamassas de cimento. Este material, usado na reabilitação de edifícios antigos, contribui para um agravamento das anomalias já existentes (Henriques, 2003); por conseguinte, existe uma grande preocupação com os ligantes e agregados prescritos para reabilitação de edifícios antigos, o que conduz a uma elevada procura de ligantes alternativos ao cimento, nomeadamente a cal aérea.

2.2 Argamassas

Verificou-se que, tanto a terra como a cal, especificamente a cal aérea, constituíram materiais utilizados historicamente na construção e particularmente em argamassas. Para fazer uma argamassa, é necessário misturar água com, no mínimo, um ligante e um agregado, podendo ser adicionados aditivos ou adjuvantes para melhorar as propriedades das argamassas. A sua formulação torna-se, assim, uma tarefa complexa, na medida em que depende de vários factores e tem de cumprir

determinadas especificações e exigências. Naturalmente, qualquer tipo de argamassa deve ter uma boa durabilidade como característica inerente.

Neste contexto, convém referir que há milhares de anos as estão associadas a construções realizadas pelo Homem, não sendo, por isso, uma descoberta inovadora. No estado de Israel, foram encontradas argamassas com mais de 10 000 anos (Alvarez et al., 2005). Segundo Bruno e Faria (2008), elas eram utilizadas desde o período do pré-histórico. Nesse período, as argamassas ou pastas tinham como ligante a terra. Eram usadas para revestir as estruturas vegetais em cabanas e, para além disso, eram usadas para o revestimento de fossas.

A aplicação de qualquer argamassa deve ter em conta critérios de compatibilidade com o suporte onde é aplicada. Assim, o reboco deve ser aplicado sobre um suporte o mais compatível possível, nomeadamente com módulo de elasticidade, permeabilidade ao vapor, entre outros, semelhantes.

Seguindo esta linha de pensamento, vão ser abordados três tipos de argamassas: argamassas de terra, argamassas de cal aérea e argamassas mistas de cal aérea e terra.

2.2.1 Argamassas de Terra

O comportamento similar dos rebocos de terra e da alvenaria de terra é, evidentemente, uma característica que revela a grande compatibilidade entre rebocos de terra e alvenaria de terra, em oposição às características de reboco à base de cimento (Hamard, 2013). Naturalmente, o reboco à base de cimento tem um comportamento mais rígido do que um reboco de terra. A alvenaria de terra, nomeadamente a taipa, possui um módulo de elasticidade na ordem dos 0.5-3 GPa, que é significativamente mais baixo do que o módulo de elasticidade do betão (15 a 50 GPa). Desta forma, rebocos de argamassas de terra e cal, com módulos de elasticidade entre 1 e 5 GPa, estão bem adaptados à alvenaria de terra (Hamard, 2013; Röhlen e Ziegert, 2011). Assim, segundo Röhlen e Ziegert (2011), é importante conhecer as propriedades dos materiais com terra (quadro 2.1), nomeadamente os rebocos. Estes exibem valores de resistência à compressão na gama de valores de outras argamassas de rebocos comuns, nomeadamente de argamassas com base em cal aérea (Veiga et al., 2010).

Quadro 2.1 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico de terra compactada e de argamassas de terra - informação de Góris (2008), consultado em Röhlen e Ziegert (2011).

	Propriedades Mecânicas	
	R_c (MPa)	E_{dim} (MPa)
Terra Compactada e Argamassas de terra	1-3	500-3000

Nas argamassas de terra, a argila desempenha o papel de ligante, sendo responsável por aglutinar os constituintes da argamassa. Uma boa formulação de argamassa de terra tem de possuir suficiente argila para prender a estrutura do esqueleto granular. As argamassas de terra são formadas por terra argilosa (areia, siltes e argila), à qual é adicionada areia e água (Röhlen e Ziegert, 2011). A argamassa deve conter, por um lado, argila suficiente para aglutinar o esqueleto granular e evitar a erosão; no entanto, a quantidade de argila não deve ser em excesso para limitar a retracção. As proporções da mistura e o tipo e preparação dos constituintes desempenham papéis-chave na qualidade final das argamassas de terra (Hamard, 2013; Röhlen e Ziegert, 2011). Estas argamassas podem ser produzidas no local da obra, onde se procede à mistura dos seus constituintes individuais, ou produzidas em fábrica, onde se obtêm produtos pré-doseados que só precisam de ser misturados com água no local da obra (Röhlen e Ziegert, 2011). A uniformidade de distribuição da granulometria das partículas conduz a uma eficiente compactação, na medida em que os grãos se podem rearranjar diminuindo, assim, o vazio entre eles (Walker et al., 2005).

Em Portugal, está a verificar-se não só um aumento de construções novas de taipa, mas também um aumento do número de reabilitações de edifícios com o mesmo material. A degradação da superfície exterior de paredes de terra é muito comum e, de acordo com Gomes et al. (2013) o comportamento das argamassas de reparação é variável consoante os diferentes suportes onde é aplicada. O referido estudo alerta para a consciencialização da importância do conjunto argamassa + suporte, que não deve ser analisado individualmente.

Um conhecimento mais alargado de argamassas de reparação com base em terra é uma temática que tem sido alvo de investigação (Gomes et al., 2012a), uma vez que muitas argamassas de reparação, quando não adequadas, causam problemas adicionais à construção. Frequentemente, encontram-se construções de terra reparadas com argamassas de cimento, na tentativa de combater a degradação, mas essas argamassas agravam os problemas e introduzem outros problemas adicionais à construção (Guelberth e Chiras, 2008).

Foram realizados já alguns estudos sobre argamassas de reparação baseadas em terra com adição de areia e com diferentes ligantes e fibras vegetais (Gomes et al, 2012a). A adição de areia nestas argamassas tem como objectivo reduzir a retracção, uma vez que a terra utilizada é constituída por uma grande percentagem de argila. Depois de ensaios experimentais realizados às argamassas, quer no estado fresco, quer no estado endurecido, foi possível chegar a algumas conclusões. A adição de percentagens baixas de fibras de cânhamo a argamassas de reparação com base em terra conduz a um aumento da quantidade de água para atingir uma boa trabalhabilidade; mesmo assim reduz a retracção linear e volumétrica, mas aumenta o índice de secagem. Por outro lado, o aumento do teor de ligante adicionado (até 15%) conduz a um aumento do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Por último, a trabalhabilidade é um parâmetro a que é necessário dar ênfase, devendo ser um dos primeiros a ser abordados quando se formulam argamassas de terra. Trabalhabilidade é um

conceito ambíguo, uma vez que traduz a facilidade com que a argamassa é aplicada no suporte pelo operador. Trata-se de um conceito que está nitidamente ligado à sensibilidade e experiência do operador (Gomes et al., 2012b), mas constitui uma propriedade muito importante. De acordo com os estudos dos autores supramencionados, as argamassas de terra analisadas foram classificadas em função da sua trabalhabilidade, estando esta fortemente influenciada pela relação água/material seco (Gomes et al., 2012b). Assim, foram consideradas com boa trabalhabilidade as argamassas que apresentam espalhamento entre 160 e 170 mm.

2.2.2 Argamassas de Cal

Apesar da grande diversidade de ligantes existentes, a cal aérea é o ligante que tem sido utilizada há mais tempo pelo Homem em construções. Uma das razões que justifica este facto poderá estar associada à disponibilidade local desta matéria-prima (Elert et. al., 2002). O conhecimento das técnicas de execução e aplicação de argamassas de cal foi transmitido pelos pedreiros ao longo de gerações. Contudo, actualmente, a arte manual da cal voltou a ganhar relevo, sendo usual o uso de argamassas de cal, quer em construção nova, quer na reabilitação de edifícios. Hoje em dia é, assim, possível encontrar muita bibliografia internacional sobre argamassas de cal de que se podem citar alguns exemplos (Faria et al., 2008; Cizer et al., 2009, Veiga et al., 2010; Gameiro et al., 2014). A cal apagada em pasta adquire melhores características após longo período de extinção, nomeadamente por imersão em água (Margalha, 2010). Porém, esta tradição não era compatível com as práticas modernas de industrialização, sendo muitas vezes utilizada a cal hidratada seca em pó (Faria et al., 2008).

2.2.3 Argamassas Mistas de Cal Aérea e Terra

Actualmente, constata-se um crescente interesse pelas argamassas de cal aérea e terra. Na bibliografia, é possível encontrar informação sobre este tipo de argamassas (Jamú, 2013; Dias, 2013; Hamard et al., 2013; Faria et al., 2013; Faria et al., 2014; Santos, 2014). Contudo, é ainda notória a falta de conhecimentos científicos nesta área. Antagonicamente ao que se verifica relativamente às argamassas de cal aérea, que se encontram bem caracterizadas, as argamassas de cal aérea e terra carecem de uma melhor caracterização, quer ao nível físico, quer ao nível mecânico. Com efeito, apenas com um conhecimento mais amplo e sólido das argamassas é possível torná-las um material de construção dos tempos modernos.

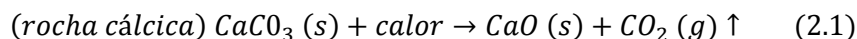
2.3 Matérias- primas

2.3.1 Cal aérea

De acordo com a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011), a cal aérea endurece em contacto com o dióxido de carbono presente no ar, não apresentando por isso, propriedades hidráulicas.

A cal aérea obtém-se através da cozedura de calcários (CaCO_3 , carbonato de cálcio) detentores de elevado grau de pureza. A temperatura de cozedura da rocha cálcica varia entre 800°C e os 1000°C , situando-se normalmente a cerca de 900°C . Num primeiro momento, ocorre libertação da água que a rocha possui; depois, e a partir de certa temperatura, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio. O processo de decomposição da rocha dolomítica é análogo ao que ocorre com a rocha cálcica, variando apenas a temperatura de cozedura, que é muito inferior no caso da rocha dolomítica. Para este tipo de rocha, o processo de decomposição ocorre a temperaturas situadas entre os 400°C e os 480°C (Margalha, 2011).

A calcinação (equação 2.1), como anteriormente referido, ocorre a temperaturas na ordem dos 900°C e, neste processo, o carbonato de cálcio (CaCO_3) decompõe-se em óxido de cálcio (CaO), também designando por cal viva. Neste processo, ocorre ainda a libertação de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera (Faria-Rodrigues, 2004).



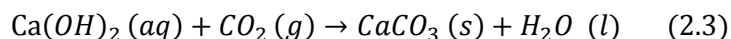
Como referido anteriormente, a cal viva, que é sobretudo óxido de cálcio (CaO), é um produto muito reativo, por conseguinte, necessita de ser hidratado (ou extinto). Neste caso, da hidratação do óxido de cálcio (expressão 2.2) resulta hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), tratando-se, assim, de uma cal hidratada, conhecida também pelos termos de apagada ou extinta. Neste processo, ocorre também a libertação de calor. Em suma, está-se perante uma reacção exotérmica, na medida em que há libertação de calor para o exterior (Faria-Rodrigues, 2004; Margalha, 2011; Sousa- Coutinho, 2012).

De acordo com Cizer et al.(2009), a reacção de hidratação influencia consideravelmente as características da cal aérea, quer esta esteja no estado fresco, quer no estado endurecido. Este resultado implica cuidados redobrados no processo de produção da cal. Com efeito, na produção da cal em pó, deve ter-se especial cuidado com a quantidade de água adicionada.



Se a hidratação ocorrer apenas pela adição da água necessária para a que reacção ocorra, por exemplo por aspersão, obtém-se cal hidratada seca em pó. Todavia, se a água adicionada for excessiva, por exemplo por imersão, obtém-se cal hidratada em pasta (Margalha, 2011).

O endurecimento da cal aérea hidratada deriva da reacção lenta com o dióxido de carbono (CO_2) existente na atmosfera. Deste modo, volta a obter-se a composição da rocha inicial, carbonato de cálcio. Esta reacção (expressão 2.3) da cal com o dióxido de carbono designa-se de carbonatação (Faria, 2004; Margalha, 2011).



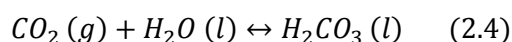
O hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) não apresenta propriedades hidráulicas, porque é solúvel na água (1,3g/l), tornando-se ainda mais solúvel em água salgada. Este resultado justifica a razão pela qual as argamassas de cal aérea hidratada não podem ser usadas em obras marítimas, excepto quando têm adições (Coutinho, 2006).

2.3.2 Reacção de carbonatação em argamassas de cal aérea – O papel da água

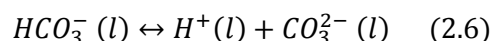
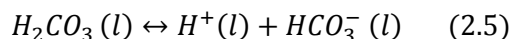
Quando a portlandite (hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), presente nas argamassas de cal aérea de origem cálcica, reage com o dióxido de carbono livre forma-se carbonato de cálcio (CaCO_3). A carbonatação é, pois, o mecanismo responsável pelo endurecimento das argamassas de cal aérea.

Segundo Lawrence et al. (2006) o processo de carbonatação, que é lento, pode demorar meses ou até anos a ficar concluído. Este processo tem início com a libertação do excesso de água existente nos poros da argamassa, e que não é necessária para a difusão do dióxido de carbono.

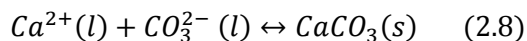
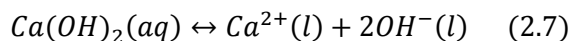
A água tem um papel extremamente importante no processo de carbonatação. Uma parte da água presente na argamassa evapora, enquanto outra parte absorve dióxido de carbono (CO_2). Desse modo obtém-se o ácido carbónico (H_2CO_3) (expressão 2.4), tornando o pH da água ácido.



Seguidamente, o ácido carbónico converte-se em iões bicarbonato e em iões carbonato, ou seja, HCO_3^- e CO_3^{2-} , respectivamente (expressão 2.5 e expressão 2.6).



A precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) na solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) resulta da reacção dos iões Ca^{2+} com os iões CO_3^{2-} . Como anteriormente referido, os iões carbonato (CO_3^{2-}) são originados pela decomposição dos iões bicarbonato (HCO_3^-) (Cultrone et al., 2005).



Em suma, o teor de água existente na argamassa (nomeadamente, nos poros da argamassa) é um factor que influencia, em grande escala, todo o processo de carbonatação. A difusão de CO₂ nos poros é condicionada pela presença de água, especificamente pela saturação dos poros. Deste modo, para ocorrer carbonatação, é fundamental a presença de água, uma vez que esta é imprescindível para a dissolução do dióxido de carbono; contudo, a quantidade de água não pode ser excessiva, factor este impeditivo da difusão de CO₂. Neste caso, a diluição de CO₂ tornar-se-ia um processo lento, o que implicaria uma lenta carbonatação, ou em casos extremos, esta poderia não ocorrer (Lawrence et al., 2006; Thomason et al., 2005).

A humidade relativa condiciona o estado em que a água se vai encontrar nos poros da argamassa, isto é, para valores de humidade relativa inferiores a 65%, existe água sob a forma de vapor de água; para valores acima de 95%, existe água no estado líquido e os poros encontram-se saturados. Para valores entre 65% e os 95% existe vapor de água e água no estado líquido (Thomason et al., 2005). Se a estrutura porosa estiver seca não irá ocorrer a difusão do CO₂; por outro lado, se estiver saturada não irá permitir a difusão do CO₂, tem de haver, assim, um equilíbrio. De acordo com Faria e Martins (2011), ocorre carbonatação em argamassas de cal aérea, com níveis de humidade relativa entre os 50% e os 95%.

2.3.3 Terra argilosa

A terra, também designada por solo nesta dissertação, tem origem na decomposição de rochas. Com efeito, esta decomposição resulta da meteorização por agentes físicos, químicos e biológicos. De entre os agentes físicos destaca-se o clima. A variação de temperatura provoca expansão e contracção das rochas, conduzindo, assim, à sua fractura. A acção de gelo e degelo, ao longo das fracturas, conduz ao seu aumento. Por outro lado, o ataque da rocha com água que contenha ácidos orgânicos é um dos principais agentes de decomposição química. Deste modo, a rocha alterada em solo adquire maior porosidade, permitindo a penetração da água. Estão, portanto, criadas as condições para o desenvolvimento de organismo vegetais e animais que, por sua vez, fornecem matéria orgânica ao solo.

É fundamental referir que se podem distinguir dois tipos de solos: solos de alteração e solos sedimentares. Os solos de alteração são aqueles cuja formação foi referida anteriormente, sendo que, nestes casos, a meteorização das rochas ocorre no mesmo local onde se formaram. Por seu lado, os solos sedimentares resultam da degradação (física e/ou química) da rocha mãe, seguida de transporte das partículas (pelo vento, pelos rios, pela água de escorrência superficial) até aos locais onde são

depositados, por perda de energia do meio de transporte. Estes solos são formados por três processos: meteorização/erosão, seguidamente, por transporte e, por último, por deposição.

Independentemente do tipo de formação, o solo é sempre caracterizado como um conjunto de partículas de origem mineral e orgânica. Os vazios entre as partículas contêm água e/ou ar (LNEC,1962). A matéria orgânica, como anteriormente explicado, tem origem em organismos vegetais ou animais vivos ou em decomposição. A matéria mineral é proveniente do intemperismo da rocha de origem. Os principais constituintes minerais são:

- Cascalhos e areias – provenientes da desintegração física e mecânica;
- Siltes e argilas - a decomposição química conduz à formação de argila como último produto.

Quando se usam solos para construção, é necessário fazer uma selecção prévia. Naturalmente, é essencial excluir a fase orgânica dos solos, que existe principalmente nas camadas superiores. Os solos ricos em matéria orgânica absorvem muita água e são altamente compressíveis (Hall e Djerbit, 2004). Com efeito, os solos usados em construções com terra consistem somente na sua fase mineral (Pacheco-Torgal e Jalali, 2012).

De entre as diversas fracções granulométricas que compõem um solo, a mais fina é a fracção argilosa. Do ponto de vista da engenharia de solos, é definida como sendo a fracção constituída por partículas inferiores a 2 μm . Os principais grupos de minerais de argila são:

- Esmectite, tendo como mineral mais representativo a montmorilonite de fórmula química genérica $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$;
- Mica, tendo como mineral mais representativo a illite, que apresenta como composição química $(\text{K,H}_3\text{O})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$;
- Caulinite, cuja fórmula química pode ter a expressão seguinte: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Com efeito, os minerais argilosos são principalmente constituídos por silicatos, ou seja, constituídos por átomos de silício (Si) e oxigénio (O). Estes silicatos são hidratados e são principalmente de alumínio (Al), ferro (Fe), magnésio (Mg), potássio (K) e cálcio (Ca) (Gomes,1986).

Um dos parâmetros importantes a atender no que ao comportamento das argilas diz respeito é a sua superfície específica. Este parâmetro, em conjunto com a granulometria, permite distinguir as argilas de outras partículas do solo. Se no caso da areia e do silte a relação da área superficial das partículas com o seu volume ou massa é muito pequena, na fracção de argila o mesmo não se verifica. Com efeito, as partículas de argila possuem uma grande superfície específica. A superfície específica da montmorilonite situa-se entre os 700-800 m^2/g , seguindo-se a illite com valores na ordem dos 70-140 m^2/g , por fim, os minerais do grupo da caulinite apresentam valores de superfície específica menores, entre 10-30 m^2/g (Almeida,1991; Gillot, 1987).

Na terra, o papel dos agregados é desempenhado pela areia, silte e gravilha, que têm como funcionalidade dar volume e massa e devem, tanto quanto possível, apresentar uma granulometria

diversificada. A argila apresenta-se como ligante natural da terra, como acontece nas argamassas de cal aérea, por exemplo. A argila permite o endurecimento das argamassas e, naturalmente, a coesão dos agregados (Minke, 2006).

Existem dois tipos de unidades cristalográficas: unidade tetraédrica e unidade octaédrica (figura 2.1 e 2.2). As várias unidades associadas dão origem a folhas; por sua vez, ao agrupamento destas folhas dá-se o nome de camadas estruturais.

A unidade tetraédrica é formada por um átomo de silício (Si^{4+}), que ocupa a posição central e quatro átomos de oxigénio (O^{2-}), que estão posicionados nos quatro vértices. A unidade octaédrica é constituída por um átomo de alumínio (Al^{3+}) ou de magnésio (Mg^{2+}) equidistante de seis átomos de oxigénio (O^{2-}) ou hidróxilos (OH^-). As camadas estruturais da caulinite são do tipo 1:1 (Tec-Oc). As camadas estruturais da illite e da montmorilonite são do tipo 2:1 (Tec- Oc-Tec). Neste grupo, existem, assim, minerais com e sem características expansivas. O grupo dos minerais de argila com três camadas é o grupo da montmorilonite, enquanto o grupo mais importante para as não expansivas é a illite. A distância foliar de minerais de argila com três folhas é maior ou igual a 9.2 \AA , enquanto para minerais de duas folhas a distância é 7.2 \AA (Gomes,1986). A expansividade e contracção de terra com minerais de argila com três camadas deve ser compensada com a adição de aditivos minerais e orgânicos.

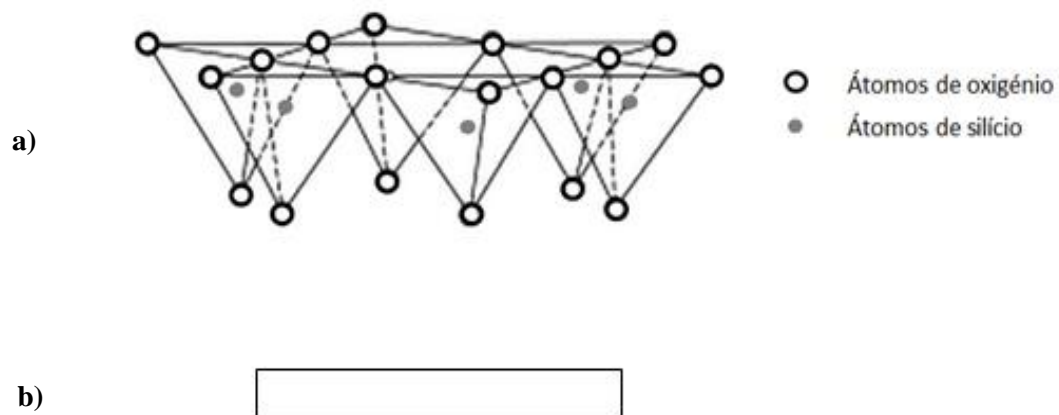


Figura 2.1 – a) Modelo cristalográfico de uma folha tetraédrica; b) Modelo esquemático de uma folha tetraédrica (adaptada de Murray,2006)

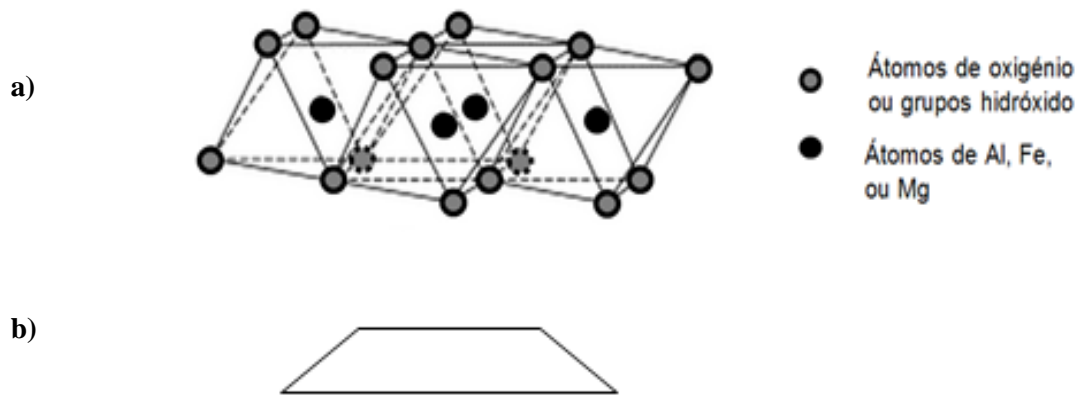


Figura 2.2 – a) Modelo cristalográfico de uma folha octaédrica; b) Modelo esquemático de uma folha octaédrica (adaptada de Murray, 2006).

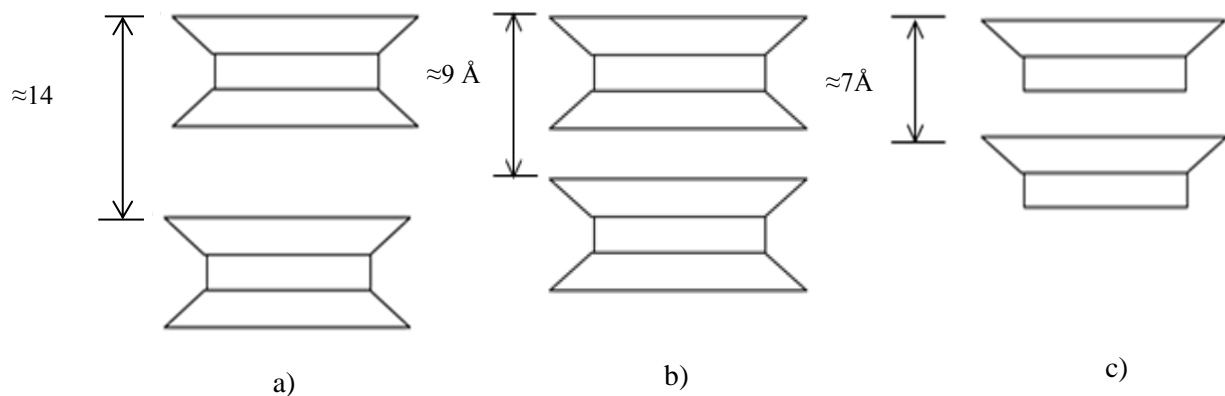


Figura 2.2 – a) e b) Modelos esquemáticos de minerais argilas de tripla folha (Tec-Oc-Tec) e respectiva distância foliar, ex: a) montmorilonite e ex: b) elite; c) Modelo esquemático de minerais argilas de dupla folha (Tec-Oc) e respectiva distância foliar, ex: c) caulinite).

A reactividade intercrystalina é menor em minerais de argila com duas camadas, quando comparada com a de minerais de argila com três camadas. Este facto significa que a capacidade de ligante é maior em minerais de argilas com três camadas.

Segundo Röhlen e Ziegert (2011), a força de ligação entre os minerais de argila deve-se às diferentes cargas localizadas na superfície das folhas. Contrariamente ao que acontece nos ligantes tradicionais usados na construção, onde o endurecimento é obtido através da cura (por carbonatação ou hidratação), o efeito coesivo das partículas de argila deriva da atracção física das partículas.

Como já foi anteriormente mencionado, as argilas apresentam uma elevada superfície específica, quando comparadas com outros materiais. Este facto justifica a sua capacidade e aptidão para anexar outras substâncias. Para além dos factos mencionados, a água afecta directamente as propriedades da argila como ligante. Com efeito, quanto maior for o número de moléculas presas na estrutura porosa dos minerais de argila, menor será a força de ligação; no entanto, quando as moléculas de água são libertadas a força de ligação torna-se novamente forte. Todavia, com níveis

altos de humidade relativa, os minerais de terra não estão em perigo de atingir um estado de maleabilidade que lhes permitisse serem reformulados. Para que tal aconteça, são necessárias grandes quantidades de água, não sendo suficiente vapor de água (Röhlen e Ziegert, 2011). As argamassas de terra, constituídas por minerais argilosos com três camadas, vão apresentar uma elevada capacidade de absorção, quando comparadas com argamassas constituídas por minerais argilosos de duas camadas. As argilas não expansivas vão conduzir também a argamassas de terra com retracção reduzida (Röhlen e Zieget, 2011).

2.3.4 Agregados

O agregado é o constituinte que se pode encontrar em maior quantidade nas argamassas. É, genericamente, uma areia ou a mistura de vários tipos de areias e influencia o comportamento das argamassas. Por este motivo, os agregados devem ser escolhidos de forma consciente, uma vez que podem alterar as propriedades das argamassas (Rato, 2006; Melo e Carneiro, 2010). Do ponto de vista mineralógico, distinguem-se dois tipos de areias: siliciosas (quartzosas e graníticas) e calcárias. As areias que resultam da degradação das rochas podem, ainda, ser classificadas de acordo com a sua proveniência. Os agregados podem assim ter origem natural, artificial, ou ser provenientes de resíduos ou produtos reciclados/valorizados. Os designados materiais naturais são aqueles que são extraídos em fragmentos e cuja degradação se deve a agentes erosivos como a água e o vento. Por seu turno, os materiais de origem artificial são aqueles cuja degradação é processada por via industrial como, por exemplo, a areia britada. Em Portugal, é usual serem utilizadas areias provenientes de jazidas, assim como areias do rio e do mar, que são convenientemente lavadas. Contudo, por razões principalmente ambientais, têm-se verificado reservas na utilização de areias de rio. As areias calcárias resultam dos desperdícios de pedreiras, enquanto as areias siliciosas, que são na sua maioria constituídas por quartzo, são provenientes do rio ou areeiro (Faria-Rodrigues, 2004; Rato 2006). Podem também ser utilizados como agregados resíduos de vários tipos, casos de RCD (Miranda et al., 2003; Brito et al., 2005), resíduos da indústria cerâmica (Matias et al., 2014) e resíduos de vidro (Oliveira et. al., 2013).

Como referido acima, neste trabalho, existem vários factores nos agregados que influenciam fortemente as características das argamassas: a dimensão e forma do grão, a granulometria, a dureza, a porosidade e a constituição dos agregados. Acrescente-se que também a limpeza da areia constitui um factor que, naturalmente, vai ter influência nas características da argamassa, dado que ela ganha coesão com a ligação dos grãos de areia ao ligante (Margalha, 2010).

De facto, a forma dos grãos e a granulometria são factores preponderantes na avaliação da qualidade dos agregados. As dimensões das partículas de areias estão entre os 0.063 mm e os 4 mm (Rato, 2006). Os grãos de areia de forma angulosa revelam possuir maior aptidão para aderir ao ligante do que os grãos de areia que apresentam forma arredondada. Contudo, o grão de forma angular apresenta uma maior superfície específica do que o grão arredondado. Este facto conduz a uma maior

necessidade de água durante o processo de amassadura, o que poderá influenciar de forma negativa as suas características como, por exemplo, a susceptibilidade à fendilhação, e as características mecânicas. Apesar de o grão anguloso ser mais adequado para argamassas – sendo, por conseguinte, prescrito frequentemente – se este for originário de areia britada, pode não contribuir para melhorar as características da argamassa. Este facto justifica-se pelos grãos da areia britadas serem muito angulosos mas por terem também muito pó. No que diz respeito aos agregados de forma arredondada, estes também podem aumentar o tamanho dos poros e provocar uma diminuição das resistências. Por outro lado, os grãos de forma arredondada podem funcionar como introdutores de ar, permitindo uma melhor difusão de dióxido de carbono (CO_2), o que conduzirá ao aumento da velocidade do processo de carbonatação (Lanas et al., 2004; Faria-Rodrigues, 2004; Margalha, 2011). Deste modo, é fundamental otimizar a curva granulométrica, melhorando o rearranjo dos agregados nos vazios das argamassas e contribuindo para o aperfeiçoamento de características desejáveis, nomeadamente melhor trabalhabilidade, compacidade e resistências mecânicas (Rato, 2006).

A areia desempenha um papel fundamental nas características das argamassas, funcionando como o seu esqueleto, cuja coesão está dependente do agregado. Nas argamassas de cal aérea, a areia tem como característica separar as partículas de cal, facilitando o processo de carbonatação. Para além disso, facilita a distribuição por toda a argamassa das retracções que possam vir a ocorrer. As reacções de endurecimento das argamassas ocorrem essencialmente pela interacção com a cal (ligante); a areia pode possuir determinadas substâncias que, a longo prazo, reajam com o hidróxido de cálcio, contribuindo também para o endurecimento da argamassa (Margalha, 2010; Margalha, 2011).

No caso de argamassas de terra, a areia está, muitas vezes, presente como agregado. Os agregados de areia são adicionados para empobrecer a mistura da argila, ou seja, adicionam-se partículas com granulometria mais grosseira a uma mistura de grãos predominantemente constituída por partículas finas (como é o caso de solos maioritariamente argilosos). Deste modo, a adição de partículas com granulometria mais grossa a solos argilosos vai permitir menor adição de água para formular as argamassas. Sabe-se que quanto menor for a adição de água, menor será o número de vazios existentes após a secagem. Naturalmente, quanto menos vazios existirem menores serão as tensões no material, as quais poderiam conduzir a fissuração. Deste modo, empobrecer a mistura tende a diminuir a retracção durante a secagem. A adição de areia conduz à junção de fracções granulométricas que não existiam, ou existiam em quantidade insuficiente na mistura de terra. Este facto vai provocar um aumento da resistência mecânica das argamassas. Uma extensa distribuição granulométrica permite reduzir a sensibilidade da terra relativamente à água. Em boa verdade, a resistência da mistura depende não só da estabilidade da estrutura granulométrica, como também dos minerais de argila solúveis em água. As misturas que contêm somente partículas finas são mais susceptíveis à água no estado líquido e ao gelo, apresentando maior propensão para fissurar.

A forma dos grãos de areia influencia, também, as argamassas de terra. Os grãos angulares formam uma estrutura mais estável que os arredondados, influenciando a sua resistência.

A cor das argamassas de terra, mas principalmente de cal, pode ser directamente influenciada pela cor dos grãos de areia. Agregados com grãos coloridos influenciam visualmente a cor das argamassas.

Apesar dos factos acima referidos, os agregados de areia não devem ser adicionados em grandes quantidades, mas se a sua proporção for demasiado pequena, a resistência da argamassa poderá diminuir (Röhlen e Ziegert, 2011) e a retracção aumentar. Portanto, os agregados são adicionados aos solos para modificar as suas propriedades mecânicas e físicas.

2.4 Principais reacções químicas que ocorrem nas argamassas de cal aérea e terra

Nas argamassas de cal aérea e terra, podem ocorrer reacções de três tipos principais, que se podem agrupar do modo seguinte:

- Reacção de carbonatação;
- Reacções de curto e longo prazo:
 - Permuta iónica e floculação;
 - Reacção pozolânica.

2.4.1 Reacção de Carbonatação

De uma forma resumida, a carbonatação consiste na reacção entre a cal e o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, que leva à formação de calcite. Naturalmente, os teores de calcite aumentam com a idade de cura, devido à evolução da reacção de carbonatação.

2.4.2 Reacções de Curto e Longo Prazo

As alterações químicas que ocorrem, devido à reacção da cal com os minerais de argila na presença de água podem ser diferenciadas em duas categorias: permuta iónica e floculação e reacções pozolânicas. Estas reacções ocorrem em dois momentos distintos; num primeiro momento, ocorre a permuta iónica e floculação; num segundo momento, dá-se a reacção pozolânica, que é uma reacção a longo prazo. Com efeito, estas reacções não ocorrem em simultâneo (Stumm, 1997).

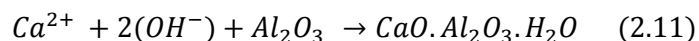
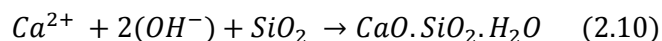
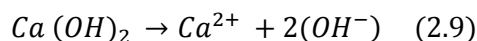
Salienta-se o facto de que a intensidade destas reacções depende, naturalmente, da natureza cristalográfica dos minerais de argila. Com efeito, o tipo de minerais de argila (montmorilonite, illite, caulinite, por exemplo) influencia directamente a quantidade de cal que é consumida, assim como a temperatura e a cura (Rao e Shivananda, 2005).

2.4.2.1 Permuta Iónica e Flocculação

Os minerais de argila apresentam predominantemente cargas negativas em solução. Esta propriedade das argilas é responsável pela capacidade de absorção de catiões. As moléculas de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) da cal entram em contacto com partículas da argila; por conseguinte, os catiões da cal (Ca^{2+}) fixam-se à superfície de argila. Os catiões (Ca^{2+}) vão substituir os catiões de potássio (K^+) e de sódio (Na^+) da argila (Stumm, 1997). Os catiões de cálcio apresentam valência superior aos catiões de sódio e potássio, isto é, apresentam maior capacidade de se combinar com outros iões, de forma a constituir uma ligação química. Assim, existe um maior número de cargas positivas e, como é evidente, um menor número de cargas negativas das partículas em suspensão. À medida que se dissolvem os catiões de cálcio, ocorre uma diminuição das cargas negativas e, consequentemente, das forças repulsivas. Verifica-se uma supremacia de forças atractivas, ocorrendo a flocculação das partículas. As partículas deixam de estar suspensas e agrupam-se, dando origem a partículas maiores (Cristelo, 2001).

2.4.2.2 Reacção Pozolânica

A longo prazo, podem também ocorrer reacções pozolânicas. Assim, num ambiente muito alcalino (pH elevado), os iões de cálcio (Ca^{2+}) e os iões de hidróxido (OH^-) da cal, juntamente com os iões de sílica e da alumina da argila, podem formar hidratos de cálcio como, por exemplo, silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (equações 2.9 a 2.11). À semelhança do que acontece com a hidratação do cimento portland formam-se agentes cimentícios (figura 2.4) que favorecem as propriedades mecânicas (Boardman, 2001). Alguns minerais de argila poderão comportar-se como pozolanas naturais, tendo portanto afinidade para reagir com a cal. A cal, quando misturada com solo argiloso, vai conduzir a um aumento de pH, o que facilita a dissolução da sílica da argila (Cristelo, 2001).



Os novos elementos encontram-se, sobretudo, em forma de gel, insolúvel em água, que depois de cristalizar conduz à cimentação das partículas, envolvendo-as (Kézdy 1979, in Neves, 1993).

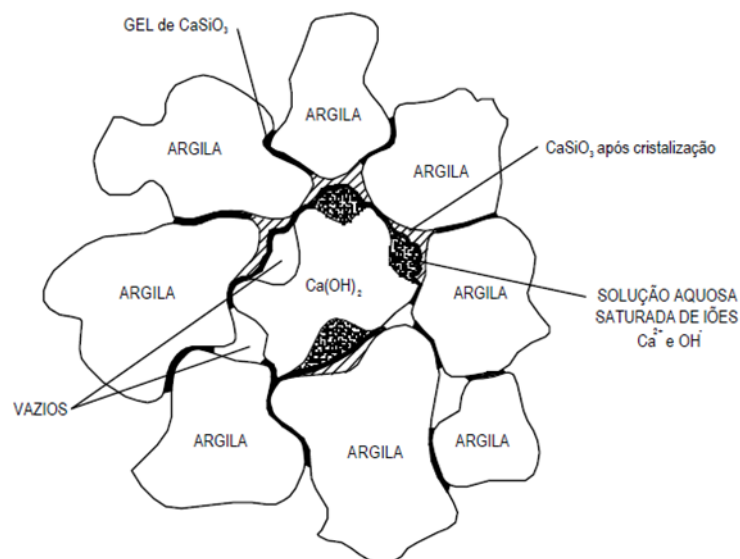


Figura 2.3 – Formação de um material cimentício (Cristelo, 2001)

Como é evidente, a reacção pozzolânica só ocorre se os seguintes requisitos forem cumpridos (Stumm, 1997; Boardman, 2001; Cristelo 2001):

- Existência de quantidade de água suficiente (humidade relativa superior a 95%) para permitir a transferência de iões Ca^{2+} e OH^- .
- Existência de um meio com pH suficientemente elevado (e portanto muita cal disponível).
- Fixação da cal, que leva a que esta adira à superfície da terra argilosa, não estando disponível para outro tipo de reacções.

Em suma, para além dos vários requisitos anteriormente mencionados, a natureza dos minerais de argila desempenha um papel fulcral nos mecanismos envolvidos nas reacções entre a cal e a argila. Os átomos dos minerais de argila da caulinite têm ligações mais fortes comparativamente com a illite e com a montmorilonite. Este facto é justificado pela menor distância foliar dos minerais de argila da caulinite (figura 2.3). A reacção pozzolânica entre a cal e a argila desenvolve-se com a destruição das camadas de sílica e alumina da argila, formando-se silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Como a caulinite possui uma reduzida capacidade de troca de catiões, subsequentemente as suas camadas estruturais não são facilmente abertas para reagirem com a cal (Bergaya et al., 2006).

2.5 Argamassas de Substituição – Especificações

As argamassas para edifícios históricos requerem várias características que nem sempre são fáceis de atingir e de harmonizar. São diversas as exigências funcionais que devem respeitar: protecção das paredes (não contribuindo para a degradação), durabilidade, quer do reboco, quer

principalmente do conjunto (alvenaria e reboco), e por fim, não prejudicar a estética do edifício (Veiga, 1998; Veiga, 2003; Henriques e Faria 2006) Devem, efectivamente, permitir uma protecção eficiente da alvenaria onde são aplicadas, evitando os processos que conduzem à degradação. O reboco deve apresentar boa compatibilidade física, mecânica e química com as alvenarias e, simultaneamente, possuir características para resistir à sua própria degradação. Salienta-se que o reboco constitui uma “superfície de sacrifício”, cujo objectivo primordial é proteger as paredes onde está aplicado (Henriques e Faria, 2006; Faria et al., 2008)

Compreende-se, portanto, que a análise das características mecânicas deve ser levada a cabo partindo do pressuposto da compatibilidade com as paredes antigas, que são caracterizadas por terem resistências baixas e altos níveis de deformabilidade. Deste ponto de vista, não há interesse em que as argamassas possuam resistências muito altas, nem especificamente um elevado módulo de elasticidade dinâmico. Naturalmente, devem possuir características que evitem a sua degradação, as quais não podem ser negligenciadas. Com efeito, para que a argamassa seja durável, deve deter resistência suficiente para suportar as agressões que, inevitavelmente, irá enfrentar (Faria-Rodrigues e Henriques, 2004; Faria et al., 2008).

As principais características que os rebocos têm de possuir, de forma a garantir elevada durabilidade, são uma reduzida absorção de água mas principalmente uma boa permeabilidade ao vapor, que conduz a melhores condições de secagem (Henriques e Faria, 2006; Veiga, 2007, Lanas e Alvarez, 2003).

Ao nível de trabalhos desenvolvidos sobre as características das argamassas para edifícios antigos, evidencia-se a investigação realizada por Veiga (2007). Como é óbvio, o estudo detalhado das argamassas e das suas respectivas características não é viável para todos os edifícios antigos, mesmo aqueles com elevado valor histórico. Porém, a investigadora recomenda uma gama de valores para as características das argamassas (quadro 2.2). Convém também enfatizar o facto de a sua conveniente preparação e aplicação serem factores preponderantes para o seu desempenho e durabilidade ao longo da sua vida útil. Quer a quantidade de água da amassadura, quer o aperto da argamassa, quer mesmo as condições de cura, apresentam-se como factores decisivos no desempenho do reboco (Veiga, 2007).

Quadro 2.2 – Gama de valores sugeridos para argamassas de substituição e refechamento de juntas aos 90 dias para edifícios antigos (adaptado de Veiga et al., 2010)

Tipo de argamassas	Características mecânicas [MPa]			Comportamento à água
	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ed [MPa]	CC [kg/ m ² .min ^{1/2}]
Reboco Exterior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	1<CC<1,5
Reboco interior	0,2-0,7	0,4-2,5	2000-5000	-
Refechamento de juntas	0,4-0,8	0,6-3,0	3000-6000	1<CC<1,5

É muito importante que se criem práticas de manutenção periódica de rebocos antigos, pelo que se torna imprescindível analisar as necessidades de intervenção nas argamassas dos edifícios e, em caso de necessidade, proceder posteriormente à reparação, substituição parcial ou total dos rebocos antigos, tendo sempre presente os critérios de compatibilidade. Agindo em conformidade com o exposto, alcançar-se-ão soluções duráveis que não prejudicam as alvenarias existentes.

O uso generalizado do cimento, durante as últimas décadas, criou novos problemas na reabilitação de edifícios antigos, que não foram previstos na altura. As argamassas de cimento apresentam uma rigidez muito mais elevada, quando comparada com alvenarias antigas. Para além disso, são pouco permeáveis à água no estado líquido mas particularmente a nível de vapor de água. Assim, as características das argamassas de cimento supramencionadas contribuíram para a degradação dos suportes agravando as suas anomalias (Mosquera et al., 2006).

3 PLANEAMENTO, ARGAMASSAS E PROVETES

3.1 Introdução à Campanha Experimental

A presente dissertação dá continuidade a dissertações realizadas anteriormente, em particular à de Jamú (2013), que desenvolveu e caracterizou, em termos físicos e mecânicos, argamassas de cal aérea e terra, analisando a influência da terra como ligante aos 90 dias de idade. No presente trabalho foi realizado a análise química e mineralógica das argamassas com 90 dias e 1 ano; foram também caracterizadas, em termos físicos e mecânicos, as mesmas argamassas (em provetes prismáticos, provetes aplicados em suporte de tijolo e no reboco aplicado no murete de taipa) com 1 ano de idade de cura.

No presente trabalho caracterizaram-se também rebocos num murete de taipa a 1 ano de idade, dando continuidade ao estudo realizado por Dias (2013), que desenvolveu e caracterizou argamassas de cal aérea e terra, analisando a influência da terra como agregado parcial.

Foi também realizada a análise química e mineralógica das argamassas com 90 dias e 180 dias realizadas por Santos (2014), dando seguimento à sua dissertação - Caracterização de argamassas de cal aérea e terra: A influência do traço e tipo de fibra natural.

Os procedimentos experimentais relativos à análise químico-mineralógica e microestrutural dos constituintes e das argamassas decorreram nos Laboratórios do Núcleo de Materiais Metálicos do Departamento de Materiais do LNEC; o ensaio de capilaridade e secagem, bem como o ensaio de resistência à compressão com argamassas de confinamento de amostras aplicadas sobre o murete de taipa foram realizados no Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Departamento de Edifícios do LNEC. Todos os restantes ensaios ocorreram nos Laboratórios de Construção do DEC/FCT-UNL.

3.2 Fases Experimentais

3.2.1 Produção de Argamassas

Foram realizadas argamassas com dois traços volumétricos distintos: 1:2 e 1:3 de cal aérea e areia. Naquelas com traço volumétrico 1:2, partiu-se de uma argamassa de referência, que apenas apresentava como ligante a cal aérea, e procedeu-se à substituição parcial da massa do ligante por uma terra argilosa nas proporções de 10%, 25% e 50% (Jamú. 2013). Nas argamassas com 25% terra em substituição parcial do ligante, procedeu-se também à adição de fibras vegetais, nomeadamente casca de arroz em duas dosagens (Santos, 2014). Nas argamassas de traço 1:3, foi realizada, para além da argamassa de referência (de cal aérea e areia), também uma em que se procedeu à substituição de 10% da areia mais fina da mistura de areias por argila (Dias, 2013).

3.2.2 Execução de Provetes

Posteriormente a serem realizadas as amassaduras e medição da consistência ao espalhamento, foram moldados provetes prismáticos. Estes provetes têm dimensões de 40x40x160 [mm³] e foram realizados em moldes metálicos que foram previamente pincelados com óleo descofrante, de modo a facilitar a posterior desmoldagem. Foram moldados seis provetes de cada composição de argamassa, de modo a obter-se, no mínimo, três valores de cada ensaio a duas idades de ensaio. Assim, é possível determinar um valor médio e também o desvio padrão de cada parâmetro. Para além de provetes prismáticos, todas as argamassas foram aplicadas sobre suporte de tijolo.

As argamassas com traço 1:3 e as argamassas com traço 1:2, que revelaram ser mais interessantes em ensaios preliminares, foram aplicadas num sistema de rebocos num murete de taipa experimental, em ambiente exterior, na Estação Natural de Revestimentos do DEC/FCT-UNL.

3.2.3 Condições de Cura

Os provetes prismáticos e em suporte de tijolo estiveram sujeitos a uma cura *standard*, isto é, estiveram em ambiente controlado com temperatura e humidade relativa ($T = 20 \pm 3^\circ\text{C}$ e $HR = 65 \pm 5\%$), e foram sujeitos a aspersão diária durante a primeira semana. Os provetes permaneceram nestas condições até à idade do ensaio (90 dias, 180 dias ou 1 ano). Os painéis de reboco aplicados no murete de taipa estiveram sujeitos às condições ambientais exteriores – os das argamassas sem fibras expostos a Nascente, e os com fibras expostos a Poente.

3.3 Identificação dos Provetes

De forma a evitar ambiguidades nos provetes existentes de cada tipo de argamassa, bem como a evitar erros nos provetes a ensaiar, torna-se fundamental apresentar a sua identificação explícita. A nomenclatura adoptada permite identificar cada provete de acordo com o tipo de ligante, o traço volumétrico e as fibras vegetais. A título de exemplo, consideram-se algumas nomenclaturas:

- CL2_25t – Refere-se a uma argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2), onde foi adicionada 25% de terra argilosa (t) como substituto da massa de ligante;
- CL2_25t_1Fv – Refere-se a uma argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2), onde foi adicionada 25% de terra (t) como substituto de 25% da massa do ligante. Em complemento, a sigla 1Fv indica que foi adicionada a quantidade máxima de fibras vegetais que se considerou garantir trabalhabilidade.
- CL3_10t(ArF) - Designa uma argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço 1:3 (3), com 10% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina (ArF).

Quadro 3.1 – Identificação das argamassas, tipo de cura e suporte em que estão aplicadas

Matéria-prima	Traço Vol.	Identificação	Adição de terra como substituto da massa ligante [%]	Adição de terra como substituto da massa de areia fina [%]	Dosagem de adição de Fibras	Proвете Prismático (Cura Standard)	Argamassa aplicada sobre o tijolo (Cura Standard)	Argamassa aplicada em reboco da taipa (Ambiente Exterior)
Cal Aérea (CL90)	1:2	CL2	0	-	-	✓	✓	✓
		CL2_10t	10	-	-	✓	✓	-
		CL2_25t	25	-	-	✓	✓	✓
		CL2_50t	50	-	-	✓	✓	-
		CL2_25t_1FV	25	-	Dosagem Máxima	✓		
		CL2_25t_0,5FV	25	-	Metade da Dosagem Máxima	✓		
	1:3	CL3	-	0	-	-	-	✓
		CL3_10t (ArF)	-	10	-	-	-	✓

3.4 Matérias-Primas Utilizadas

Como anteriormente exposto, o fabrico de argamassas corresponde à primeira etapa da campanha experimental, e decorreu no âmbito das dissertações anteriores (Jamú, 2013; Dias, 2013 e Santos, 2014). Torna-se, assim, fundamental, para uma melhor compreensão dos resultados e obviando a necessidade de consulta de todas as dissertações anteriores, no presente capítulo descrever as matérias-primas utilizadas e os procedimentos efectuados para a realização dos provetes prismáticos, argamassas aplicadas sobre tijolo cerâmico e rebocos aplicados sobre o murete de taipa.

3.4.1 Cal Aérea

Na realização de todas as argamassas, foi utilizada cal aérea hidratada em pó. Esta cal, da marca LUSICAL, é uma cal cálcica (CL90), de acordo com a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011) e é comercializada com a designação H100. A cal é identificada, ao longo deste trabalho, como CL. No quadro 3.2 apresenta-se a composição química da cal CL90, obtida por fluorescência de raios X.

Quadro 3.2 – Composição química de cal aérea (% de massa) (Gameiro et al., 2014)

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₆	PF*
Cal Aérea	-	0.01	0.15	0.01	3.907	76.74	-	0.02	0.04	0.01	0.45

*PF – Perda ao Fogo

Foi também determinada a baridade de todos os constituintes das argamassas (Carneiro, 2012; Jamú, 2013; Santos, 2014), segundo a norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2000). Com a baridade é possível estabelecer a relação entre o traço ponderal e o traço volumétrico. Os resultados encontram-se no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Baridade dos constituintes das argamassas (Carneiro, 2012; Jamú, 2013; Santos, 2014)

Material	Baridade [g/cm ³]
CL	0.362
Terra argilosa	1.090
APAS 12	1.412
APAS 20	1.405
APAS 30	1.388
Mistura de Areias	1.463
Casca de Arroz	0.102

Ao analisar a composição química da cal aérea, constata-se que a soma dos compostos CaO (óxido de cálcio) e MgO (óxido de magnésio) representam 99,7% dos identificados. Para além disso, o composto MgO (óxido de magnésio) assume um valor inferior a 5% em massa. Ao comparar estes valores com os valores de referência mencionados na norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011), verifica-se que a cal aérea respeita os requisitos químicos exigidos. Assim, deste ponto de vista, confirma-se a sua classificação como CL90. Na figura 3.1, apresenta-se a composição mineralógica da cal aérea, através da análise de difracção de raios X (DRX).

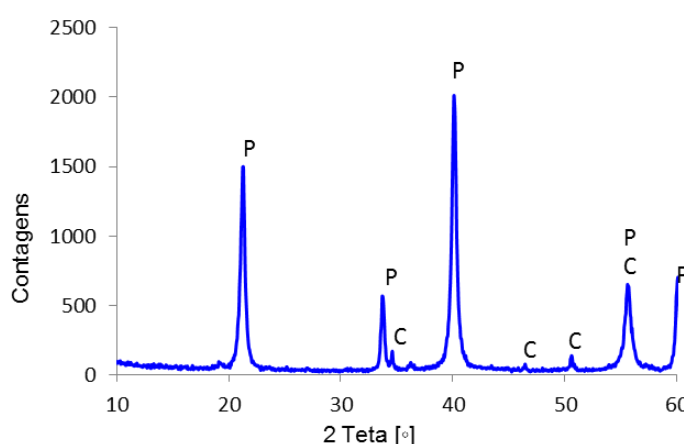


Figura 3.1 – Difratograma da cal aérea (CL). Notação: P - Portlandite ; C - Calcite.

Como se pode observar da análise da figura 3.1, a cal aérea é constituída, por portlandite (P) e calcite (C). Na figura 3.2 observam-se as curvas termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (dTG) da cal aérea, onde é possível observar os picos referentes à desidratação da portlandite e descarbonatação da calcite.

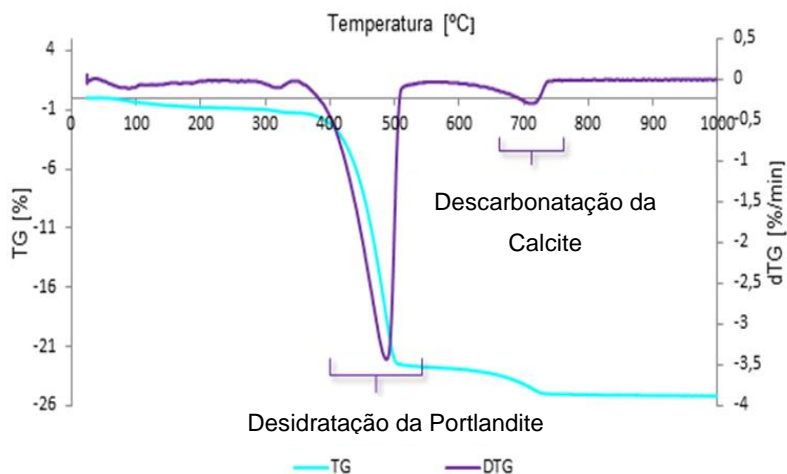


Figura 3.2 – Curvas termogravimétrica (TG e dTG) da cal aérea.

3.4.2 Terra

A terra utilizada nesta dissertação é a mesma utilizada num estudo anterior, realizado por Gomes et al. (2012a, 2012b, 2012c, 2012d), no âmbito da tese de doutoramento da primeira autora. A terra (figura 3.3) foi disponibilizada pela empresa Sorgila - Sociedade de Argilas, e é proveniente da zona de Rendinha (Pombal). A selecção da terra baseou-se nos seguintes critérios: conter argila de baixa expansibilidade, ter uma elevada percentagem de finos e ter reduzida retracção linear.

No quadro 3.3, encontra-se a baridade da terra argilosa.



Figura 3.3 – Pormenor da terra argilosa.

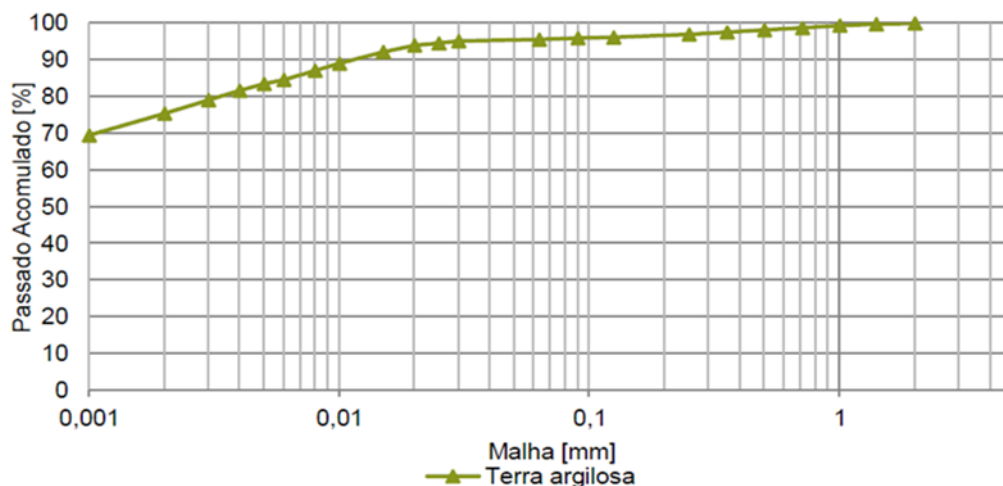


Figura 3.4 - Curva granulométrica da terra argilosa por via húmida (Gomes et al., 2012d).

Na Figura 3.4, apresenta-se a curva granulométrica por via húmida da terra argilosa. A principal diferença entre a determinação da curva granulométrica por via húmida e por via seca reside no facto de, no primeiro caso, a água desagregar os torrões de terra argilosa antes de serem peneirados. No caso da terra argilosa, o facto de esta possuir muitos torrões, torna a análise granulométrica por via seca inadequada. Este material foi também submetido à análise por DRX (Figura 3.5), de modo a determinar-se a sua composição mineralógica. Foi igualmente realizada a análise TG e dTG (figura 3.6). É possível observar, na curva do dTG da terra, o pico correspondente à desidratação da caulinite.

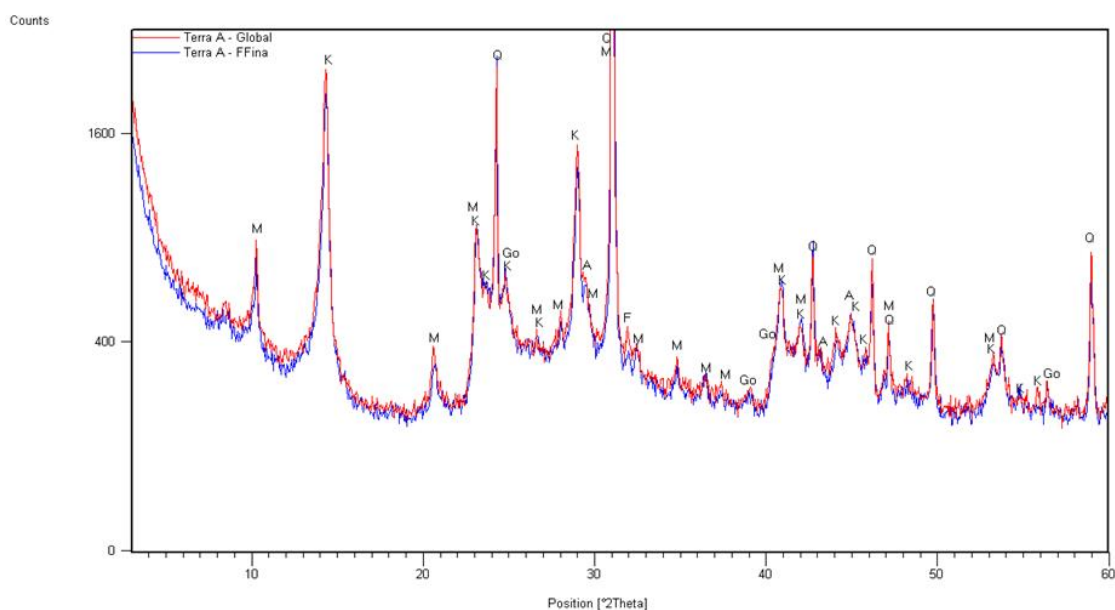


Figura 3.5 – Registos difratométricos da amostra terra argilosa (Terra A): A cor **vermelha** – Refere-se à amostra global; A cor **azul** – Refere-se à fracção fina (amostra mais concentrada na pasta da argamassa). Notação: M – Mica; K – Caulinite; Q – Quartzos; Go - Goetite; F – Feldspatos; A – Anatase.

Pela análise dos registos DRX da terra argilosa constata-se que o mineral de argila predominante é a caulinite, classificando-a assim no grupo da caulinite.

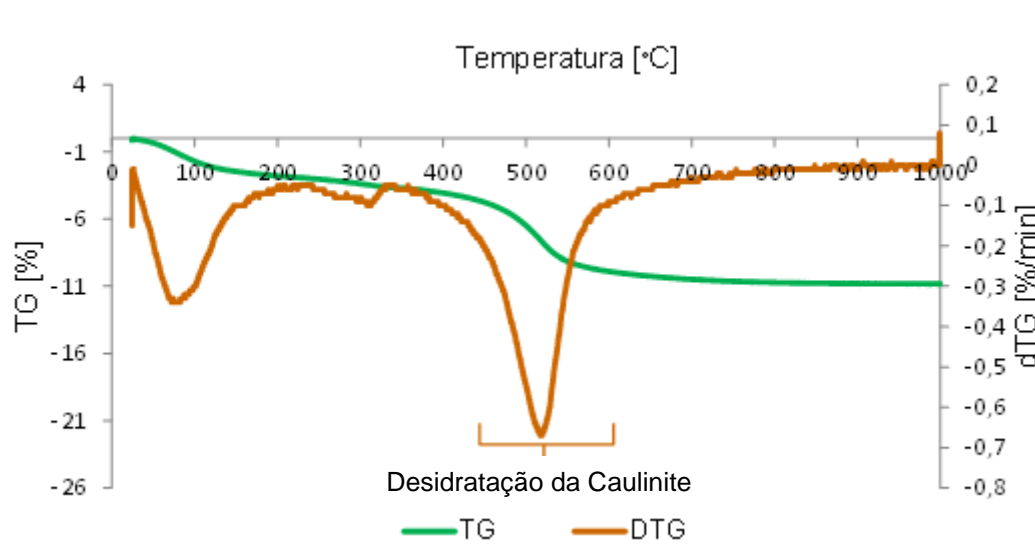


Figura 3.6 – Curvas TG e dTG da terra argilosa.

3.4.3 Agregados

O agregado usado na produção das argamassas foi uma mistura de areias siliciosas lavadas APAS 12, APAS 20 e APAS 30 (figura 3.7), com diferentes granulometrias. O traço volumétrico da mistura é 1:1,5:1,5 de APAS 12, APAS 20 e APAS 30. A areia de granulometria mais fina é a APAS 30, seguindo-se a APAS 20, de granulometria intermédia, por fim, a APAS 12, de granulometria mais grossa.

Esta mistura de areias foi utilizada nas argamassas realizadas, no âmbito dos projectos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia METACAL e LIMECONTECH. No quadro 3.3, apresenta-se a baridade das areias utilizadas, assim como a baridade da mistura dos três tipos de areias.



Figura 3.7 – Areias APAS12, APAS 20 e APAS 30.

O constituinte principal da mistura de areias é o quartzo (Q), mas é possível encontrar vestígios de feldspatos (F) como é dado ver na análise DRX– figura 3.8.

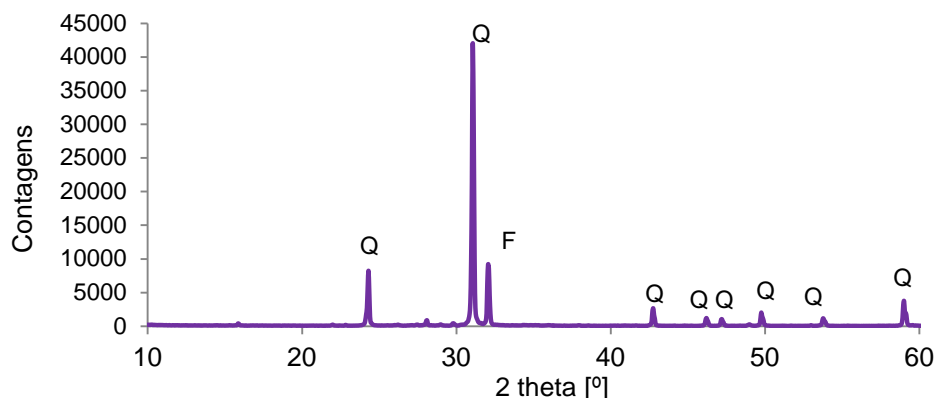


Figura 3.8 – Difratograma da mistura de areias. Notação: Q – Quartzo; F – Feldspato.

No âmbito dos projectos anteriormente referidos (METACAL e LIMECONTECH), determinou-se a granulometria das areias no LNEC com base na norma NP EN 993- 1:2000 (IPQ, 2000). Foi realizada uma peneiração mecânica através de um agitador de peneiros. A série de peneiros utilizada apresenta granulometria conhecida, de acordo com o quadro 3.4

Este ensaio permite determinar as curvas granulométricas dos três tipos de areia, bem como da sua mistura (figura 3.9), ou seja, permite traçar a curva granulométrica do agregado, tendo como ordenadas a percentagem de massa de material acumulado e, nas abcissas, a malha dos peneiros. Assim, é possível aferir a dimensão dos grãos do agregado.

Quadro 3.4 – Série de peneiros utilizada para a peneiração mecânica (adaptado de Massena, 2011).

Abertura da malha [mm]		
APAS12	APAS 30	APAS 30 e Mistura de Areias
4,75	4,75	4,75
2,36	2,36	2,36
1,7	1,7	1,7
1,18	1,18	1,18
0,85	0,85	0,85
0,71	0,71	0,71
0,6	0,6	0,6
-	0,5	0,5
-	0,425	0,425
-	-	0,3
-	-	0,25
-	-	0,212
-	-	0,15

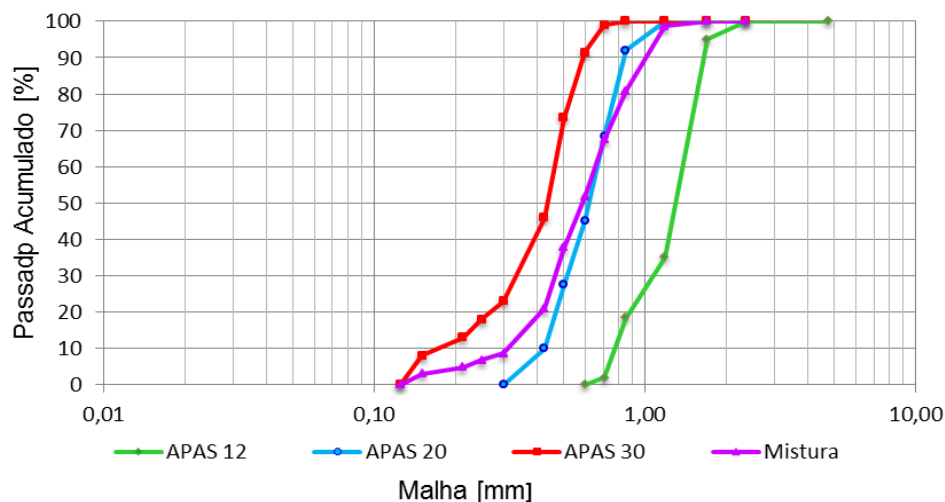


Figura 3.9 – Curva granulométrica de cada areia e da mistura de areias (Carneiro, 2012).

3.4.4 Fibra Vegetal

Em algumas argamassas foi adicionada fibra vegetal da casca de arroz, fibra proveniente da empresa Orivárzea (figura 3.10). O arroz com casca, depois de recolhido, é sujeito a uma pré-limpeza, que consiste na passagem por uma série de peneiros com vista à separação das impurezas do arroz. Depois, é feita uma secagem e a separação da casca do resto do grão. A baridade da casca de arroz foi determinada, segundo a norma NP EN 1097-3:2000 (IPQ, 2000) - quadro 3.3



Figura 3.10 – Fibra vegetal (casca de arroz).

3.5 Preparação de Argamassas

Os procedimentos relativos às amassaduras tiveram como base a norma EN 1015-2 (CEN, 1998). Em boa verdade, como a norma anteriormente referida se destina a argamassas de cimento, o procedimento adoptado apresenta alterações relativamente a esta norma, tendo sido definido no âmbito do projecto FCT METACAL (Faria, 2011).

Como já mencionado anteriormente (secção 3.2.1), analisaram-se argamassas com diferentes traços volumétricos e diferentes adições de terra. Assim, foram estudadas argamassas com traço volumétrico de 1:2 e 1:3 de cal aérea e areia. Nas de traço volumétrico 1:2, partiu-se de uma argamassa de referência (de cal aérea e areia) e procedeu-se à substituição parcial da massa do ligante por uma terra argilosa nas proporções de 10%, 25% e 50%. Em algumas das argamassas com substituição de 25% de cal aérea por terra argilosa foram adicionadas fibras vegetais, nomeadamente, casca de arroz, com duas dosagens distintas. O critério para a escolha da quantidade destas fibras foi a máxima quantidade possível que permitisse obter trabalhabilidade da argamassa. Assim, depois de se ter definido a dosagem máxima de casca de arroz a adicionar, formulou-se ainda outra com metade daquele valor.

Para melhor distinguir as argamassas com e sem fibras vegetais, optou-se pela distinção cromática da sua designação. As que foram formuladas com cal aérea e terra sem fibras foi atribuída a cor [azul](#), enquanto para as com fibras foi atribuída a cor [verde](#) (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014):

- **CL2-** Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2).
- **CL2_10t** - Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2), com 10% de terra argilosa (t) como substituto da massa de ligante.
- **CL2_25t**- Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2), com 25% de terra argilosa (t) como substituto da massa de ligante.
- **CL2_50t**- Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2), com 50% de terra argilosa (t) como substituto da massa de ligante.
- **CL2b_25t_1FV**- Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2), com 25% de terra (t) como substituto de 25% da massa do ligante. Em complemento, a sigla 1FV indica que foi adicionada a quantidade máxima de fibras vegetais que garantem trabalhabilidade.
- **CL2b_25t_0.5FV** -Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:2 (2), com 25% de terra (t) como substituto de 25% da massa do ligante. Em complemento, a sigla 0.5FV indica que foi adicionada metade da quantidade máxima de fibras vegetais que garantem trabalhabilidade.

Como supramencionado, foram formulados dois tipos de argamassas com traço volumétrico 1:3: a argamassa de referência, ou seja, a argamassa de cal aérea e a argamassa em que se procedeu à substituição da areia mais fina da mistura por argila. Concretamente, substituiu-se 10% de areia fina por terra argilosa. Nas argamassas com traço volumétrico 1:3, foi atribuída a cor [roxa](#), seguindo assim também uma distinção cromática, como acontece nas argamassas com traço volumétrico 1:2. Nestas argamassas, as designações atribuídas tiveram também em conta o traço volumétrico e quantidade de terra argilosa adicionada, ou seja:

- **CL3-** Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:3 (3).
- **CL3_10t(ArF)** - Argamassa de cal aérea (CL) e areia de traço volumétrico 1:3 (3), com 10% de massa de terra em substituição de igual parcela de areia fina (ArF).

Para sintetizar de uma forma clara e bastante explícita o tipo e composição das argamassas anteriormente referidas, apresenta-se o quadro 3.5

Quadro 3.5 – Identificação dos provetes (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014)

Matéria-Prima	Traço Vol.	Identificação	Terra como substituto da massa de cal [%]	Terra como substituto da massa de areia fina [%]	Adição de fibras face à massa de cal [%]
Cal Aérea (CL90)	1:2	CL2	0	-	-
		CL2_10t	10	-	-
		CL2_25t	25	-	-
		CL2_50t	50	-	-
		CL2_25t_1FV	25	-	18
		CL2_25t_0,5FV	25	-	9
	1:3	CL3	-	0	-
		CL3_10t (ArF)	-	10	-

No quadro 3.6, apresentam-se as quantidades dos diferentes constituintes, isto é, a quantidade de areias introduzidas (APAS 12, APAS 20, APAS 30), de terra argilosa e de cal aérea (CL). A água adicionada para formulação das argamassas é proveniente da rede pública. Como neste tipo de argamassas existe argila, a água introduzida na amassadura influencia a trabalhabilidade, aplicação e características físicas destas (Gomes et al., 2012c). A quantidade de água foi ponderada de forma a conduzir a argamassas com um espalhamento de 150 ± 5 mm.

Quadro 3.6 – Dosagem dos constituintes das argamassas (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014)

Identificação	Massa [g]					Volume de água [ml]
	APAS 12	APAS 20	APAS 30	Terra Argilosa	CL	
CL2	1129,6	1686	1665,6	0	579,2	1000
CL2_10t	1129,6	1686	1665,6	57,9	521,3	1025
CL2_25t	1129,6	1686	1665,6	144,8	434,4	1025
CL2_50t	1129,6	1686	1665,6	289,6	289,6	1025
CL2_25t_1FV	903,7	1348,8	1332,5	115,6	346,9	1050
CL2_25t_0,5FV	903,7	1348,8	1332,5	115,6	346,9	940
CL3	1129,6	1686	1665,6	0	386,1	975
CL3_10t (ArF)	1129,6	1686	1665,6	166,50	386,1	1000

No quadro 3.6 é possível verificar, nas argamassas identificadas com a cor **verde**, às quais foi adicionada 25% de terra argilosa em substituição da massa de cal aérea, que houve uma redução da massa global de cal, terra, areias e água de 100% para 80%. Esta diminuição de massa foi necessária para que, com a adição das fibras, o volume final em amassadura não excedesse a capacidade da cuba misturadora.

Para expressar a quantidade de terra argilosa introduzida nos diferentes tipos de argamassa, foi determinada a razão água / terra. Foram também determinados os traços ponderais e volumétricos, que constam do quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Traço ponderal e volumétrico das argamassas (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014)

Identificação	Traço Ponderal			Traço volumétrico	Razão a/ t [-]
	CL: Terra: Areia	CL+Terra : Areia	CL :Terra :APAS12 : APAS20 : APAS30	CL: Terra: Areias	
CL2	1:0:7,7	1:7,7	-	1:0:2	-
CL2_10t	1:0,1:8,6	1:7,7	-	1:0,04:2,2	17,7
CL2_25t	1:0,3:10,3	1:7,7	-	1:0,1:2,7	7,1
CL2_50t	1:1:15,5	1:7,7	-	1:0,3:4	3,5
CL2_25t_1FV*	1:0,3:10,3	1:7,8	-	1:0,1:2,7	9,1
CL2_25t_0,5FV*	1:0,3:10,3	1:7,8	-	1:0,1:2,7	8,1
CL3	1:0:11,6	-	1:0:2,9:4,4:4,31	1:0:3	-
CL3_10t (ArF)	1:0,4:11,2	-	1:0,43:2,9:4,4:3,88	1:0,14:2,89	6,0

* O traço em massa de fibras (verdes) é de 0,18 e de 0,09, respectivamente.

3.5.1 Amassadura

Numa balança com precisão de 0.1g realizou-se a pesagem dos constituintes sólidos: cal, areias, terra e fibras. Seguidamente realizou-se uma homogeneização manual dos constituintes num tabuleiro com o auxílio de uma colher de pedreiro.

De seguida, colocou-se a mistura na cuba metálica da misturadora pondo-a em funcionamento durante 150 segundos. Nos primeiros 15-20 segundos, foi adicionada a água. Após 150 segundos de amassadura, desligou-se a misturadora e raspou-se a amassadura dos bordos e do fundo da cuba com o auxílio de uma espátula. Voltou-se a colocar a misturadora mecânica em funcionamento, durante mais 30 segundos. Após este processo considerou-se o processo de amassadura concluído (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014). Na Figura 3.11 ilustra-se o processo de amassadura.



Figura 3.11 – Processo de amassadura: a) pesagem dos constituintes; b) mistura manual dos constituintes; c) misturadora mecânica; d) adição de água (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).

3.5.2 Consistência por Espalhamento

Concluído o processo de amassadura e com a argamassa no seu estado fresco, realizou-se o ensaio de consistência por espalhamento. Este ensaio foi realizado tendo como base a norma EN 1015-3 (CEN,1999). O espalhamento quantifica a trabalhabilidade e a consistência da argamassa, ou seja, este ensaio quantifica a fluidez das argamassas no estado fresco, fornecendo, desta forma, informação sobre a sua deformabilidade, quando submetida a um determinado tipo de pressão (Faria-Rodrigues, 2004). Na figura 3.12, é possível observar as diferentes fases do ensaio, assim como os utensílios utilizados.



Figura 3.12 – Ensaio de consistência por espalhamento: a) Mesa de espalhamento e molde troncocónico; b) enchimento do molde; c) molde com argamassa após regularização da superfície; d) argamassa após remoção do molde; e) medição do diâmetro do espalhamento (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).

Apresentam-se no quadro 3.8 os resultados médios e os desvios-padrão referentes ao ensaio de consistência por espalhamento das argamassas no estado fresco.

Quadro 3.8 – Consistência por espalhamento de todas as argamassas (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014)

Identificação	Consistência por Espalhamento [mm]
CL2	146,6 ± 1,4
CL2_10t	151,6 ± 4,3
CL2_25t	147,1 ± 3,6
CL2_50t	145,8 ± 4,0
CL2_25t_1FV	146,3 ± 1,9
CL2_25t_0,5FV	142,5 ± 2,6
CL3	152,6 ± 2,7
CL3_10t (ArF)	149,13 ± 2,0

3.6 Execução de Provetes

3.6.1 Provetes Prismáticos

Após ser realizado o ensaio de consistência por espalhamento foram realizados provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 (mm³). Para que os resultados dos provetes pudessem ser comparáveis entre si tornou-se fulcral que o procedimento de execução fosse rigorosamente o mesmo, ao longo da produção dos provetes. Este critério também teve de ser cumprido nos ensaios realizados.

A fim de realizar os provetes prismáticos foram utilizados moldes metálicos. Cada molde permite produzir três provetes em simultâneo, ou seja, apresenta três compartimentos, cada um com dimensões de 40 mm×40 mm ×160 mm. Os provetes foram realizados segundo a norma EN 1015-11 (CEN,1999). A argamassa foi colocada nos moldes em duas camadas: a primeira camada preencheu cerca de metade do compartimento do molde e foi compactada mecanicamente com 20 pancadas. A segunda camada preencheu totalmente o molde e foi também mecanicamente compactada com 20 pancadas. De seguida, retirou-se o molde do compactador mecânico e rasou-se a superfície com o auxílio de uma colher de pedreiro. A figura 3.13 ilustra a execução dos provetes prismáticos. Os provetes foram desmoldados ao fim de uma semana (figura 3.14).



Figura 3.13 - Execução de provetes: a) moldes metálicos; b) compactação mecânica; c) nivelamento dos provetes (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).



Figura 3.14- Desmoldagem dos provetes prismáticos (Autoria: Naila Jamú e Inês Dias).

3.6.2 Provetes em Tijolo

Foram aplicadas argamassas sobre uma face de tijolo furado com dimensões 20 x30 x 7 (cm³), pretendendo-se, deste modo, simular a influência da sucção do suporte de tijolo. Para a aplicação da argamassa foi necessária a colocação de um molde de madeira rectangular com 1,5 cm de altura sobre a face do tijolo. Antes da colocação do molde de madeira humedeceu-se a superfície do tijolo. A homogeneização da energia de projecção da argamassa sobre o tijolo foi obtida pela queda desta de uma altura definida de 70 cm, através de um dispositivo apropriado. A argamassa foi rasada com o auxílio de uma talocha pelo nível do primeiro molde (com 1,5 cm de altura), iniciando-se, assim, o processo de cura. Passados alguns minutos, foi retirado o molde de madeira. A figura 3.15 ilustra a execução dos provetes.

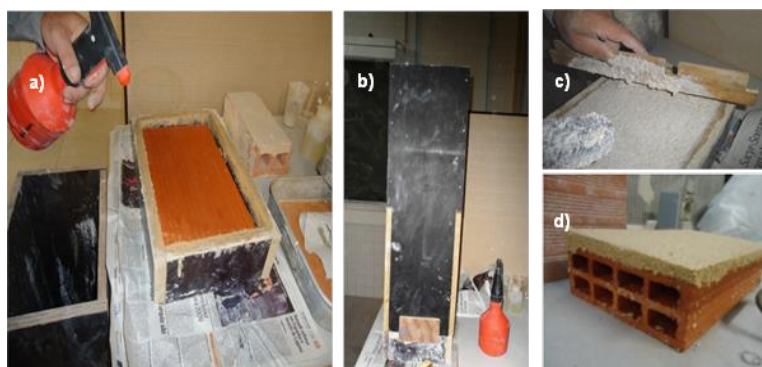


Figura 3.15 – Execução dos provetes em tijolo: a) aspersão do tijolo já com o molde para a espessura colocado; b) afastador de madeira com 70 cm altura; c) nivelamento da argamassa; d) tijolo após desmoldagem. (autoria Naila Jamú e Inês Dias).

3.6.3 Reboco no murete de taipa

No exterior, junto do DEC da UNL-FCT, foi construído um murete de taipa com fundação directa no terreno. Este murete foi dividido em quatro painéis com dimensões aproximadas de 50 x 160 [cm²]. Em cada painel (orientado a nascente) foram aplicados rebocos com quatro tipos de argamassas distintas: **CL2**, **CL2_25t**, **CL3_10t (ArF)** e **CL3**. Os rebocos foram constituídos por duas camadas distintas: foi aplicado o salpisco e, após uma semana, foi aplicada a camada de base. O salpisco foi aplicado com cerca de 1 cm de espessura e com uma forma irregular. Esta camada continha a mesma dosagem dos constituintes sólidos das argamassas realizadas em laboratório, mas mais 10% de água. Posteriormente, foi aplicada a camada de base com a mesma quantidade de água das argamassas realizadas em laboratório, e com uma espessura variável entre 1 e 1,5 cm. O aperto e a regularização do reboco foram realizados com uma talocha. Os painéis de rebocos distam 10 cm do solo. Nas figuras 3.16 e 3.17 ilustra-se o murete de taipa não revestido e as diferentes fases de execução dos painéis de reboco.

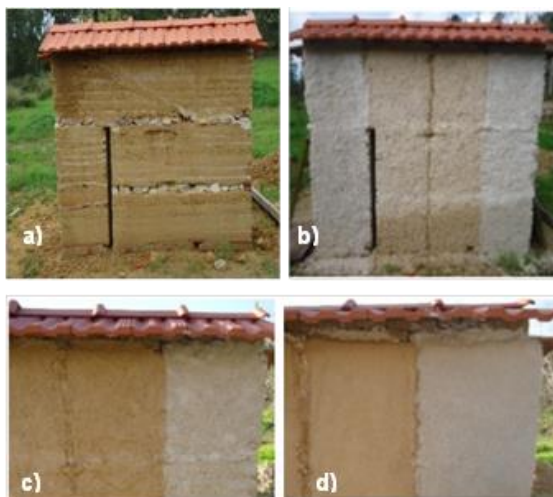


Figura 3.16 – a) Murete de taipa; b) murete após aplicação do salpisco; c) acabamento do salpisco ; d) acabamento do reboco final (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).



Figura 3.17 – a) Parque de muretes do DEC/ FCT- UNL; b) murete de taipa com os diferentes painéis de reboco.

3.7 Condições de Cura

3.7.1 Cura Standard

Os provetes prismáticos e os sobre tijolo foram sujeitos a uma cura controlada em laboratório; estiveram sujeitos a temperatura de 20 ± 3 °C e humidade relativa de 65%. Diariamente, do 2º ao 5º dia após a sua realização, os provetes foram aspergidos com água (fig. 3.18). Permaneceram na sala climatizada ao longo de todo o período de cura (fig. 3.19).



Figura 3.18 - Aspersão dos provetes: a) provetes prismáticos b) provetes em tijolo (autoria: Naila Jamú e Inês Dias).



Figura 3.19 – a) Sala climatizada; b) provetes em condições de cura na sala climatizada; c) condições de cura na sala climatizada.

3.7.2 Cura em Ambiente Exterior

O reboco aplicado sobre o murete de taipa esteve sujeito a cura em ambiente exterior, exposto às acções climáticas existentes. Como o reboco foi aplicado no mês de Dezembro, são relevantes as condições climáticas a que esteve sujeito, nomeadamente chuvas intensas e constantes. Com efeito, não foi necessário aspergir o murete nem o reboco para simular condições semelhantes aos provetes sobre tijolo.

4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS

Neste capítulo, são descritos os vários ensaios e respectivos procedimentos realizados com os vários provetes.

A autora do presente trabalho efectuou os ensaios físico-mecânicos nos provetes prismáticos, provetes em suporte de tijolo e no murete de taipa em argamassas com 1 ano de idade, dando continuidade a dissertações anteriores que os tinham analisado aos 90 dias (Jamú, 2013; Dias, 2013) ou aos 28, 90 e 180 dias (Santos, 2014). Neste último caso, pela inexistência de provetes prismáticos disponíveis, estes não puderam ser analisados pela autora a 1 ano de idade, sendo a comparação realizada com base nos valores que tinham sido obtidos a 180 dias. Para uma melhor percepção da evolução das características das argamassas, a partir daqui serão também apresentados os ensaios e resultados obtidos a idades mais jovens (90 dias e 180 dias) realizados pelos autores supramencionados.

No estado endurecido, os provetes foram ensaiados em duas idades diferentes, 90 e 180 dias, para as argamassas CL2; CL2_10t; CL2_25t; CL2_50t, e 90 dias e 1 ano, para as argamassas CL2_25t_1FV e CL2_25t_0,5FV. Em cada uma das idades e para cada tipo de argamassa, foram realizados um mínimo de três ensaios, o que permite obter o valor médio e respectivo desvio padrão. Complementarmente a autora procedeu a ensaios complementares aos que tinham sido anteriormente efectuados a partir dos provetes e amostras existentes.

4.1 Ensaios realizados nos provetes prismáticos

Os procedimentos adoptados a 1 ano de idade dos provetes e reboco procuraram ser exactamente os mesmos que tinham sido adoptados a idades mais jovens. Os primeiros ensaios de caracterização realizados com os provetes de dimensões 40 x 40 x 160 [mm³] foram ensaios não destrutivos, nomeadamente os de condutibilidade térmica, massa volúmica aparente e módulo de elasticidade dinâmico. De seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios destrutivos. O ensaio de resistência à tracção por flexão originou dois provetes de menores dimensões. Com uma das metades, realizou-se o ensaio de resistência à compressão. Deste ensaio, obtiveram-se três fragmentos do provete que foram sujeitos aos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, porosidade aberta e massa volúmica, ensaios químicos e mineralógicos (DRX e TG/dTG). Com a outra metade foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade, secagem e resistência ao ataque por sulfatos. Na figura 4.1 apresenta-se esquematicamente a sequência de ensaios realizada com os provetes prismáticos a cada idade.

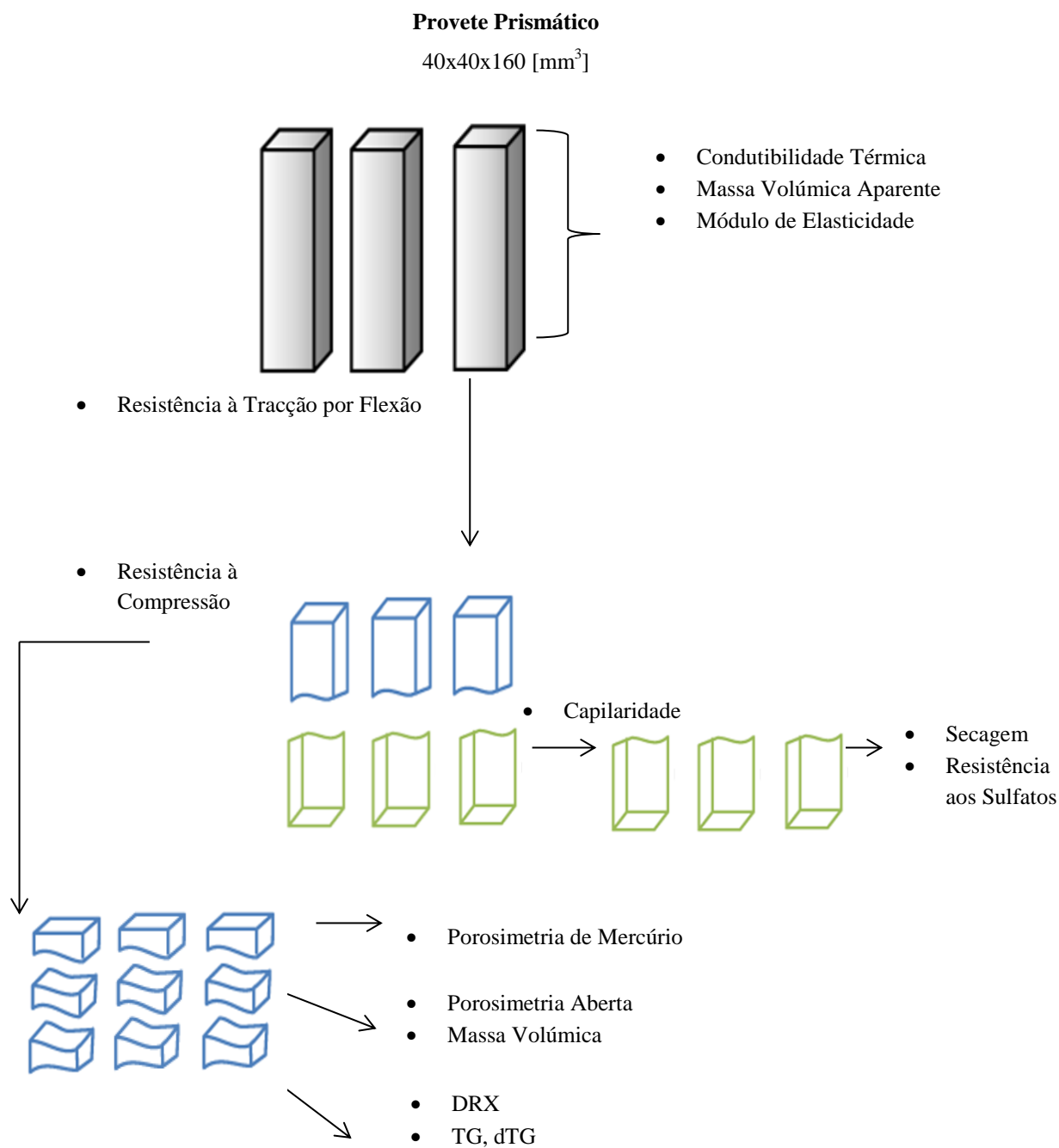


Figura 4.1 - Esquema da sequência de ensaios realizados aos provetes prismáticos.

4.1.1 Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica (λ , expressa em W/m.°C) é uma propriedade que caracteriza os materiais e exprime a forma como eles se deixam atravessar pelo calor. Ela representa a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material, por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura. Um material que não se deixa atravessar facilmente pelo calor, ou seja, um bom isolante térmico tem um valor de condutibilidade térmica muito reduzido, na ordem dos 0,04 W/m °C, para os poliestirenos (Henriques, 2011). As questões relacionadas com o conforto térmico dos edifícios são uma preocupação constante, relacionando-se com a economia de energia e com a sustentabilidade durante a vida útil dos edifícios. Deste modo, se as argamassas em estudo forem aplicadas no reboco corrente de edifícios, e muito embora a fraca espessura destes, é interessante ter conhecimento sobre a condutibilidade térmica, de forma a avaliar o contributo que podem ter para o desempenho térmico dos edifícios. Para determinar a condutibilidade térmica, foi usado o equipamento ISOMET 2104 (*Heat Transfer Analyser*) com uma sonda de superfície API 21014.

O procedimento do ensaio foi baseado no manual do equipamento. A espessura mínima do material tem que ser de 1,5 cm. Esta condição verifica-se para os provetes prismáticos, contudo a área da sonda de superfície (de 60 mm de diâmetro) é superior à área de contacto com o prisma (face com 4cm de largura). Devido a este facto, os valores obtidos só são comparáveis para argamassas ensaiadas com as mesmas condições. Para cada tipo de argamassa, foram ensaiados 3 provetes. Em cada provete prismático efectuaram-se medições em duas faces lisas. Se a diferença entre duas medições fosse inferior a 5%, efectuar-se-iam três medições. Para garantir que não havia dissipação de calor através de outros materiais, ou seja, para determinar o calor que passava apenas através de cada provete, este foi colocado em cima de uma placa de XPS (material isolante térmico). De seguida, colocou-se a sonda de superfície sobre a face lisa do provete e registaram-se as leituras fornecidas pelo equipamento (figura 4.2). O tempo necessário para obter cada leitura foi de cerca de 15-25 minutos.

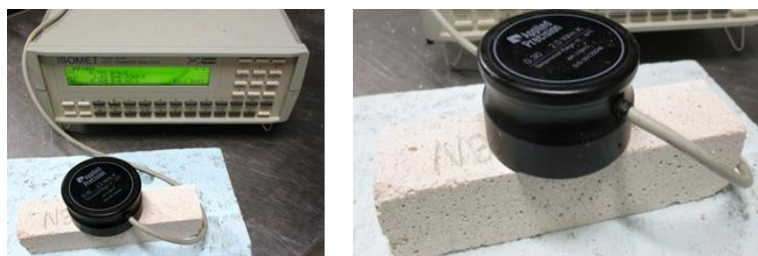


Figura 4.2 – Medição da condutibilidade térmica em provetes prismáticos.

4.1.2 Massa Volúmica Aparente

Após a realização do ensaio da condutibilidade térmica, determinou-se a massa volúmica dos provetes. Foram medidos três provetes de cada tipo de argamassa. Com uma craveira digital, foram realizadas três medições em cada um: comprimento (L), largura (b) e altura (h) – figura 4.3. A sua massa foi medida numa balança digital com 0.001g de precisão. Depois de determinadas as dimensões lineares, foi determinado o volume. Com o volume calculado e a massa determinou-se a massa volúmica. Calculou-se a média dos três provetes e o desvio padrão.

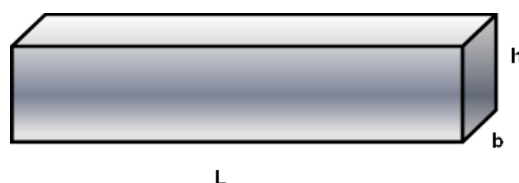


Figura 4.3 – Representação esquemática de um provete prismático com dimensões 40 x 40 x 160 mm³.

4.1.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (Ed) foi determinado com base na norma NP EN 14146 (IPQ, 2007) definida para métodos de ensaio de pedra natural, através da medição da frequência de ressonância fundamental, isto é, a frequência mais baixa para a qual se obtém amplitude máxima (Faria-Rodrigues, 2004).

O Ed fornece informação relativa à elasticidade do material, estando, assim, relacionado com a deformabilidade e rigidez. Este ensaio foi realizado aos provetes prismáticos com diferentes idades (90 dias, 180 dias e 1 ano). Trata-se de um ensaio não destrutivo, em que três provetes de cada argamassa são retirados da sala climatizada e colocados no equipamento mecânico “ZEUS Resonance Meter” (ZRM 001) - Figura 4.4. Este equipamento emite vibrações numa das extremidades do provete e recebe na outra. Através da introdução dos dados da massa e das dimensões de cada provete, o equipamento fornece directamente o valor de Ed.



Figura 4.4 – Equipamento ZEUS Resonance Meter utilizado para determinação do valor de Ed..

De seguida, registam-se as leituras de E_d fornecidas pelo software do equipamento através da seguinte expressão:

$$E_d = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6}$$

onde E_d [MPa] é o módulo de elasticidade dinâmico, l [mm] é o comprimento do provete, f_0 [Hz] frequência de ressonância longitudinal, ρ [N/m³] peso volúmico do provete (calculado a partir da massa do provete e do volume) e g [$g=9,80665 \text{ m/s}^2$] corresponde aceleração da gravidade.

Neste trabalho para cada provete efectuaram-se quatro medições alternando o topo em contacto com o emissor e as faces de apoio. Em alguns casos, obtiveram-se duas gamas de valores distintas para uma mesma posição, que foram posteriormente comparadas com os valores das resistências mecânicas e de valores bibliográficos de argamassas com base em cal aérea, seleccionando-se, assim, a gama de valores correcta. Seguidamente, calculou-se a média dos três provetes e o respectivo desvio padrão.

4.1.4 Resistências Mecânicas

Como mencionado anteriormente, os ensaios mecânicos realizados são ensaios destrutivos. Foram realizados dois tipos de ensaios mecânicos: resistência à tracção por flexão (R_t) e resistência à compressão (R_c). Ambos levam o provete à rotura e o equipamento utilizado foi o mesmo, embora com as devidas adaptações.

4.1.4.1 Resistência à tracção por flexão

O ensaio de R_t realizou-se às idades de 90 dias, 180 dias (só para as argamassas de Santos (2014)) e 1 ano, sendo, assim possível analisar a evolução das resistências mecânicas ao longo do tempo. O procedimento deste ensaio é realizado de acordo com a norma EN 1015-11:1999/A1:2006 (CEN, 2006). Foi utilizada a máquina de tracção universal “ZWICK Z050” com uma célula de carga de 2 kN. Neste ensaio foi aplicado uma carga pontual a meio vão; por sua vez, a face inferior está apoiada em dois pontos que estão afastados entre si de 100mm. Assim, a rotura do provete ocorrerá na face inferior, traccionada – figura 4.5.

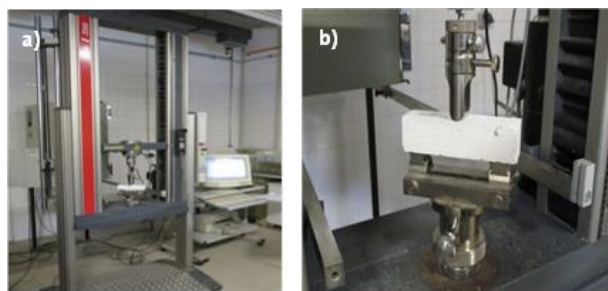


Figura 4.5 – Ensaio de resistência à tracção por flexão: a) Equipamento utilizado (ZWICK Z050) b) provete antes da rotura.

Introduziu-se no *software* a massa e as dimensões do provete. Seguidamente colocou-se o provete sobre os apoios, com a face mais rugosa disposta lateralmente, permitindo que a carga actuasse numa face lisa. Deu-se início ao ensaio e estabeleceu-se como velocidade de aplicação da carga 0,2 mm/min. Com efeito, aplicou-se a carga sem choque, cuja velocidade de incremento permite que a rotura ocorra entre os 30 e os 90 s. O *software* mostra um gráfico da força aplicada [N] em função do tempo [s] e também a força máxima [F_t] aplicada que permitiu a rotura do provete. A resistência à tracção de cada provete foi determinada de acordo com a seguinte equação:

$$R_t = 1.5 \times F_t \times \frac{1}{b^3}$$

onde R_t [MPa] é a resistência à tracção por flexão, F_t [N] a carga de rotura de tracção por flexão, l [l=100mm] a distância entre pontos de apoios e b [b=40mm] corresponde ao lado da secção quadrada do provete.

O resultado deste ensaio corresponde ao valor médio dos valores obtidos nos três provetes de cada tipo de argamassa.

4.1.4.2 Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão, R_c, à semelhança do ensaio de resistência à tracção por flexão, foi realizado de acordo com o procedimento da norma EN 1015-11:1999/A1:2006 (CEN, 2006) e foi utilizado o mesmo equipamento mecânico do ensaio anterior “ZWICK Z050”, mas com uma célula de carga com 50 kN, adequada à compressão. Este ensaio foi também realizado às mesmas idades, isto é, 90 dias, 180 dias e 1 ano. Assim, metade do provete foi sujeito à rotura. Colocou-se meio provete com a face rugosa disposta lateralmente, permitindo que a carga actuasse numa superfície lisa, por conseguinte, sem irregularidades. No *software*, foram introduzidos os valores da

massa e as respectivas dimensões do provete. O carregamento foi aplicado sem choque, com uma velocidade de 0.7 mm/min, permitindo que a rotura ocorresse entre 30 e 90 s.

O software mostra os valores da força aplicada em função do tempo [s], bem como a força máxima de compressão [Fc] que ocorre antes da rotura. Registou-se o valor da força aplicada e o valor da força [kN] a dividir pela área da aplicação da carga, neste caso 40mm x 40 [mm²], e obteve-se a resistência à compressão de cada provete.

Assim, a partir do meio provete, após o ensaio de resistência à compressão, resultaram 3 pedaços: um pedaço central e duas extremidades – figura 4.6. Tal como referido anteriormente, a amostra da extremidade lisa foi utilizada para o ensaio de porosidade aberta. A outra extremidade e a amostra central foram utilizadas para o ensaio de porosimetria de mercúrio e para a análise químico-mineralógica, respectivamente. Salienta-se o facto de todas as amostras resultantes do ensaio terem sido colocadas na estufa, a uma temperatura de 60 °C, até obtenção de uma massa constante (variação de massa inferior a 0.1 % entre duas pesagens com 24 h de intervalo).

As amostras, depois de serem retiradas da estufa, foram colocadas em sacos devidamente fechados para minimizar a evolução da cura. Este procedimento impede a entrada de dióxido de carbono (CO₂) e de humidade e subsequentemente evita que ocorram as reacções de carbonatação e hidratação.

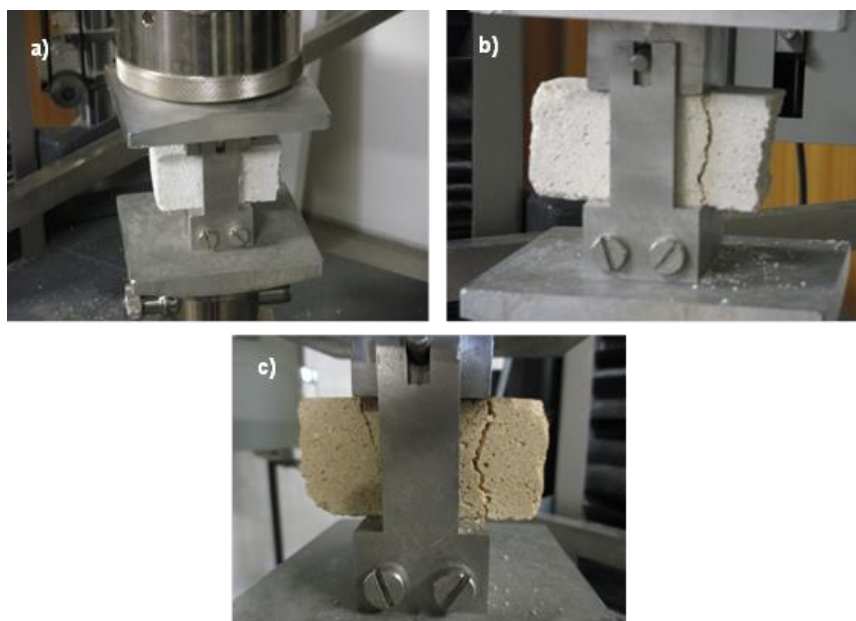


Figura 4.6 – Ensaio de resistência à compressão: a) Metade provete antes da rotura; b) e c) metade do provete após rotura.

4.1.5 Absorção de água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi determinado com base nas normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009), embora com algumas modificações. O ensaio foi realizado em

condições controladas de temperatura e humidade relativa ($T=20 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 65 \pm 5\%$) e teve como principal objectivo analisar a resposta dos provetes, quando sujeitos à presença de água.

O ensaio de absorção de água por capilaridade é realizado, quando se pretende determinar o coeficiente de capilaridade, CC, e o valor assintótico, VA, da argamassa. O coeficiente de capilaridade traduz a rapidez de absorção de água inicial, e corresponde ao declive do troço de recto inicial da curva de absorção capilar, enquanto o valor assintótico da curva de capilaridade corresponde à quantidade máxima de água absorvida em $[\text{kg}/\text{m}^2]$.

Os provetes resultantes do ensaio de resistência à tracção por flexão foram, antes do ensaio, colocados numa estufa a uma temperatura de 60°C , no mínimo durante 48h, até apresentarem massa constante. Esclarece-se que a pesagem das massas constantes dos provetes foi realizada, após os mesmos terem sido retirados da estufa e se ter esperado o tempo suficiente para o seu arrefecimento. De seguida, procedeu-se ao envolvimento das suas superfícies laterais com película aderente de polietileno. O envolvimento com a película tem a função de garantir que a evaporação de água ocorre somente pelo topo (e não pelas laterais) e que o fluxo de água é ascensional, unidireccional – figura 4.7. Considerou-se a possibilidade de ser uma alternativa à aplicação de resina ou outro produto impermeabilizante nas faces laterais. No entanto, é de salientar que em ensaios que entretanto têm vindo a ser realizados no DEC e que ainda não foram publicados, se constatou que, de um modo geral, a aplicação da película aumenta o coeficiente de capilaridade, comparativamente à aplicação de uma resina.

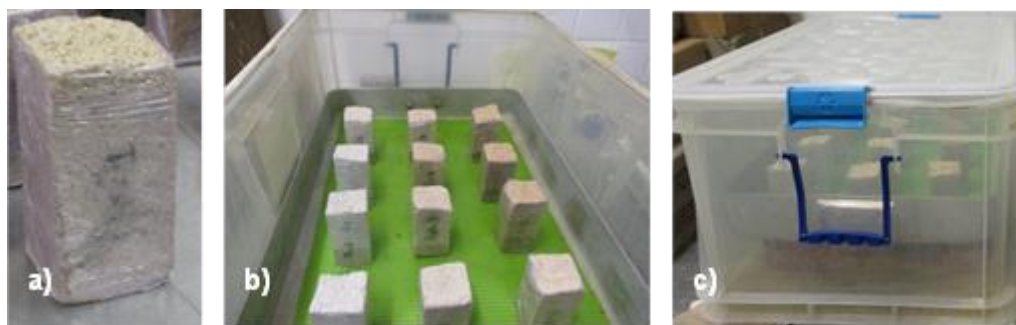


Figura 4.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade: a) provete com película aderente; b) colocação dos provetes em caixa de plástico para realização do ensaio; c) visão geral da caixa fechada com os provetes no interior.

De seguida, preparam-se as caixas para o ensaio: colocou-se água no fundo da caixa para garantir um ambiente saturado. Dentro da caixa, foi disposto um tabuleiro de base rígida apoiado sobre tijolos, estando, assim, sobreelevado em relação à água. Colocou-se uma rede de plástico dentro do tabuleiro para sobreelevar os provetes, permitindo o contacto total da base dos provetes com água. Verificou-se a horizontalidade do tabuleiro com um nível. Colocou-se água no tabuleiro, de modo a garantir uma lâmina de água de 5 mm de altura acima da rede. É necessário dar especial atenção ao facto que a altura da lâmina de água tem de ser mantida ao longo de todo o ensaio. Registou-se a

massa seca de cada provete com a película aderente e colocou-se um a um dentro do tabuleiro. Registraram-se, novamente, as massas após 5, 10, 15, 30 minutos e depois de hora a hora até a curva de absorção capilar atingir o patamar de estabilização. Com efeito, justifica-se a necessidade de acompanhar a curva de absorção capilar durante o primeiro dia de ensaio, garantindo o acompanhamento do declive inicial da água até ao início do patamar de estabilização – figura 4.8 Durante as pesagens dos provetes, foi necessário ter especial cuidado, pois o excesso de água de cada um não pode cair sobre os restantes, para não ocorrerem erros nas pesagens. Para além disto, foi necessário garantir que a caixa se encontrava fechada entre cada pesagem, a fim de manter um ambiente saturado e que o nível de água era repostado. Ao longo do ensaio foi possível visualizar a evolução da frente húmida nos prismas- figura 4.9

A curva da absorção de água por capilaridade é expressa num gráfico e apresenta, em ordenadas, a quantidade de água absorvida por área da base do provete (kg/m^2) e, em abcissas, a raiz quadrada do tempo ($\text{min}^{1/2}$). A quantidade de água absorvida (m) é expressa pela equação seguinte:

$$m = \frac{m_i - m_0}{A}$$

onde m [kg/m^2] corresponde à massa da quantidade de água absorvida, m_i [kg] a massa do provete no instante t_i , m_0 [kg] massa do provete seco com película aderente e A [$A=0.04 \times 0.04 \text{ m}^2$] a área da superfície do provete em contacto com a água.

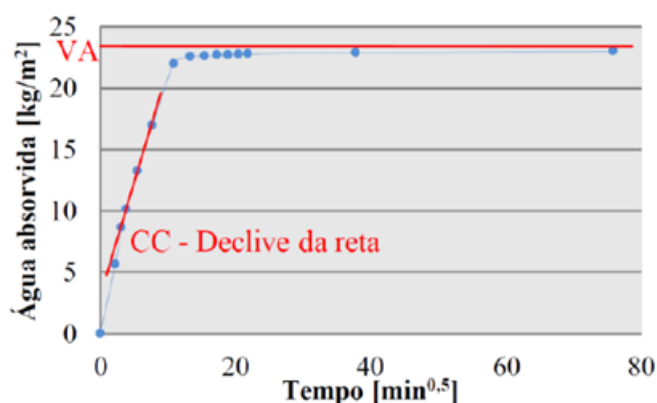


Figura 4.8 – Curva de absorção de água por capilaridade e cálculo do VA e CC (Grilo, 2013).

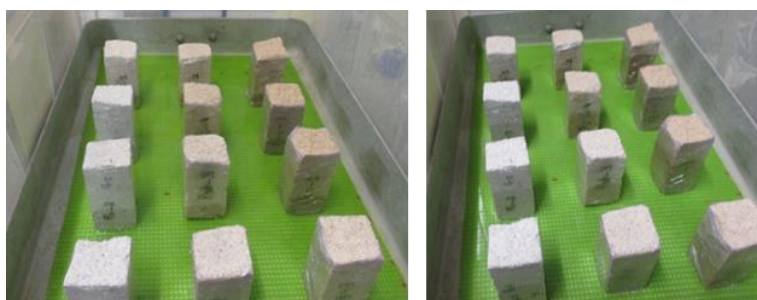


Figura 4.9 – Evolução da frente húmida nos provetes.

4.1.6 Secagem

O ensaio de secagem foi igualmente efectuado na sala de ambiente controlado ($T=20 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $HR = 65 \pm 5\%$) e iniciou-se após a finalização do ensaio de absorção de água por capilaridade. O procedimento deste ensaio teve como base o Test No. II.5 “Evaporation curve” da RILEM (1980a) e Brito et al. (2011). Para a sua concretização, manteve-se a película aderente no provete, garantindo, deste modo, que a evaporação ocorresse exclusivamente pelo topo do provete, o que evita a evaporação pelas partes laterais.

A última pesagem do ensaio de capilaridade corresponde à pesagem no instante 0 minutos do ensaio de secagem. Os provetes foram retirados da caixa em que se encontravam a realizar o ensaio de absorção de água por capilaridade. De seguida, foram colocados numa bancada metálica lisa e impermeável (impedindo secagem pela base dos provetes) junto a uma balança com precisão de 0,001 g – figura 4.10. No primeiro dia, pesaram-se hora a hora, durante 9 h consecutivas. Nos restantes dias, fizeram-se pesagens de 24 h em 24 h, até à estabilização da massa. No decurso do ensaio, efectuou-se também a curva de secagem, de modo a acompanhar a evaporação dos provetes.

A curva de secagem relaciona o teor de água [%] (ou a massa de água absorvida por área de evaporação, em $[\text{kg}/\text{m}^2]$, em ordenadas, com o tempo [h], em abcissas. O teor de água (W_t) é obtido através da equação:

$$W_t = \frac{m_t - m_0}{m_t} \times 100\%$$

onde, W_t [%] é o teor em água, m_t [kg] a massa do provete no instante t e m_0 [kg] a massa do provete seco.

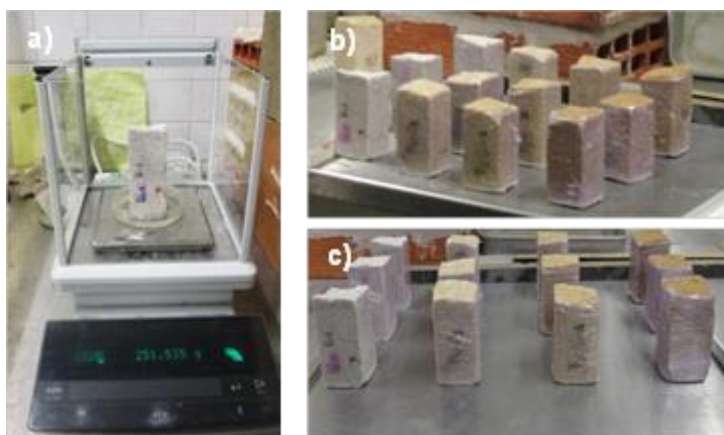


Figura 4.10 – Ensaio de Secagem: a) Medição da massa do provete; b) e c) secagem dos provetes.

Foi ainda determinada a taxa de secagem (TS) que corresponde ao declive horizontal do troço de recta inicial da curva de secagem - figura 4.11.

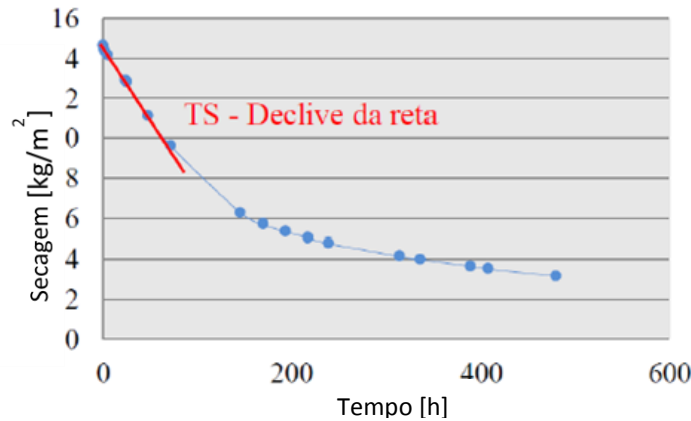


Figura 4.11 – Curva de Secagem e Taxa de Secagem (adaptado de Grilo, 2013).

Determinou-se igualmente o índice de secagem (IS). Este parâmetro foi determinado com base num método simplificado de integração numérica, a regra do trapézio, através da equação trabalhada por Brito et al. (2011) e Grilo et al. (2014):

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{W_{i-1} + W_{t_i}}{2}]}{W_{máx} \times t_f}$$

onde IS [-] é o índice de secagem, t_i [h] instante do ensaio i , t_f [h] tempo final do ensaio, w_{ti} [%] quantidade de água no provete no instante i , em relação à massa seca e $W_{máx}$ [%] corresponde à quantidade de água inicial, em relação à massa seca.

Em suma, tanto a taxa de secagem (TS) como o índice de secagem (IS) são parâmetros que permitem analisar a rapidez com que a argamassa seca. A TS dá-nos informação sobre a secagem das argamassas durante as primeiras horas, enquanto com o IS se obtém uma informação geral da secagem total. Neste sentido, pretende-se ter uma argamassa que apresente um valor elevado de TS e um IS baixo, ou seja, que apresente uma boa capacidade de secagem.

4.1.7 Porosidade aberta e massa volúmica

Para este ensaio, usaram-se os topos íntegros dos semi-provetes resultantes de resistência à compressão. Foi respeitada a norma NP EN 1936 (IPQ, 2008), mas com as devidas alterações. Efectivamente, uma vez que a norma estabelece os procedimentos de ensaio para pedras naturais, é essencial adaptar esses procedimentos aos provetes em estudo. Antes de se iniciar o ensaio, colocaram-se os provetes numa estufa à temperatura de 60 °C, durante o tempo suficiente, até atingirem massa constante. Limpavam-se bem as amostras, para eliminar o material solto à superfície, e pesaram-se todas as amostras numa balança com 0.001 g de precisão. Os provetes foram colocados

no exsicador com sistema de vácuo (o exsicador, através de um tubo, está ligado a uma bomba de vácuo); selou-se o exsicador, isolando a entrada de ar, permanecendo ligado à bomba durante 24h- figura 4.12.

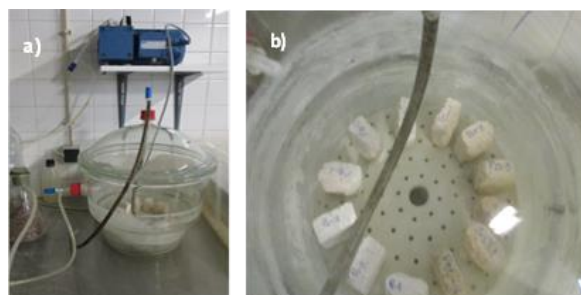


Figura 4.12 – Ensaio de porosidade aberta: a) exsicador com sistema com bomba de vácuo ligada; b) disposição dos provetes dentro do exsicador.

Com a bomba de vácuo ligada ao exsicador durante 24 h garantiu-se que todo o ar foi retirado do interior do exsicador e, naturalmente, de dentro dos provetes. Após 24 h, abriu-se a torneira que permitia a entrada de água dentro do exsicador. A entrada de água foi lenta durante mais de 15 minutos até todos os provetes se encontrarem completamente submersos. Com efeito, eles permaneceram sujeitos ao vácuo mas imersos; deste modo, os poros que estavam preenchidos com ar passaram a estar preenchidos com água. Decorridas 48 h desde o início do ensaio, desligou-se a bomba de vácuo e foram abertas as entradas de ar que estavam inicialmente seladas; deste modo, os provetes permaneceram imersos na água, mas sujeitos à pressão ambiente (permanecendo 24 h sujeitos a estas condições).

Decorridas 72 h desde o início do ensaio, retiraram-se, finalmente, os provetes do exsicador e realizou-se a pesagem em imersão (hidrostática m_2). Para tal, foi utilizado um suporte colocado dentro de água, localizado por baixo da balança. De seguida, os provetes foram colocados sobre um pano húmido, para retirar o excesso de água à superfície, e foram pesados. Esta pesagem corresponde à massa saturada (m_3) - figura 4.13.

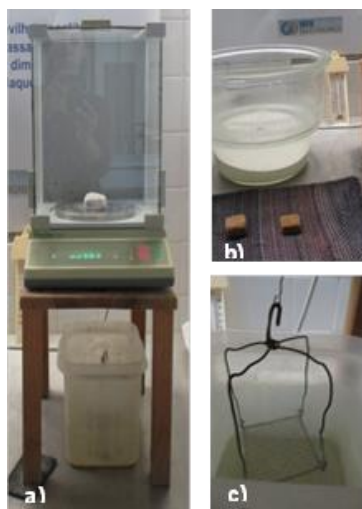


Figura 4.13 – Balança de pesagem corrente e pesagem hidrostática; b) provetes sobre pano húmido para retirar o excesso de água; c) acessório e recipiente com água para a pesagem hidrostática.

Com os valores das diferentes massas determinadas, calcula-se o valor da porosidade aberta (P_{ab}), de acordo com a seguinte equação:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100[\%]$$

onde P_{ab} [%] é a porosidade aberta, m_1 [g] é a massa da amostra seca, m_2 [g] é massa hidrostática da amostra e m_3 [g] corresponde à massa saturada da amostra.

Com os valores obtidos, foi possível calcular a massa volúmica (MV):

$$MV = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

onde MV [kg/m³] é a massa volúmica aparente, m_1 [g] é a massa da amostra seca, m_2 [g] é massa hidrostática da amostra e m_3 [g] corresponde à massa saturada da amostra

A porosidade aberta quantifica, em percentagem, o volume de poros abertos ligados ao exterior. É um indicador da compacidade da argamassa e, deste modo, é possível relacionar a porosidade aberta com as resistências mecânicas e com a condutibilidade térmica. Quanto maior for o valor da porosidade aberta, menos compacta é a argamassa.

4.1.8 Resistência aos sulfatos

O ensaio de resistência aos sulfatos foi realizado com base na norma NP EN 12370 (IPQ, 2001) para pedras naturais; contudo, o procedimento descrito na norma é demasiado destrutivo para argamassas de cal aérea (Faria- Rodrigues, 2004). Assim, utilizou-se metade da concentração de sulfato de sódio de anidro definido pela norma. Estabeleceu-se a imersão dos provetes numa solução de 3.09 % do sulfato de anidro, Na_2SO_4 . Antes dos ensaios, os provetes foram colocados numa estufa ventilada a 105 °C, durante 24h – figura 4.14



Figura 4.14 – a) Estufa ventilada; b) provetes na estufa ventilada.

Iniciou-se o ensaio com a preparação de uma solução de 32.9 g de Na_2SO_4 por cada litro de água a 20-25°C. A solução preparada foi colocada numa caixa de plástico com tampa que possuía uma rede no fundo, permitindo a absorção dos provetes pela base. Estes foram retirados da estufa e esperou-se que arrefecessem à temperatura ambiente, evitando assim o choque térmico. De seguida, registou-se a massa inicial. Os provetes foram imersos na solução de sulfato de sódio que se encontrava na caixa de plástico, garantido um afastamento entre eles e os bordos da caixa. Ficaram completamente imersos durante 2 h, após as quais se retiraram da solução e se colocaram num tabuleiro e novamente numa estufa ventilada durante 24 h, a uma temperatura de 105 °C - figura 4.15

É necessário ter especial cuidado quando se retiram os provetes da caixa, porque estes devem ser rolados numa membrana sintética, para retirar a solução em excesso, a fim de evitar a aderência ao tabuleiro metálico, por secagem da solução entre as faces de contacto.

Após as 24 h os provetes foram retirados da estufa, terminando assim o tempo de secagem, e foram novamente pesados individualmente. O ciclo imersão/secagem foi repetido durante 20 dias úteis, correspondentes a 20 ciclos. Foi acrescentada solução, sempre que necessário, de forma a garantir a sua total imersão

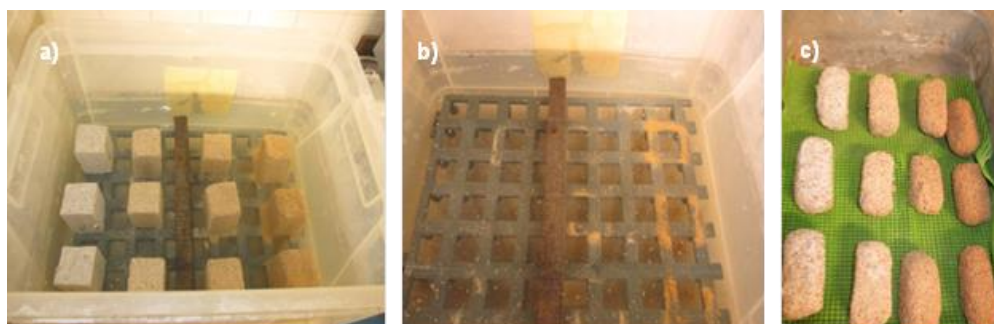


Figura 4.15 – Ensaio de resistência aos sulfatos: a) provetes imersos em solução de sulfato de anidro; b) perda de massa dos provetes que ficou depositada na rede no fundo da caixa; c) remoção superficial da solução em excesso. É visível a degradação apresentada pelos provetes.

4.1.9 Porosimetria de Mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio realizou-se quando se pretendia analisar as propriedades microestruturais da argamassa, ou seja, quando se pretendia estudar a estrutura porosa: porosidade aberta e diâmetro dos poros. Neste ensaio, foi introduzido mercúrio, com recurso a um porosímetro “Autopore IV” da Micrometrics, o qual possui duas portas de baixa pressão e uma porta de alta pressão (Rato, 2006). O volume de mercúrio necessário para preencher todos os poros acessíveis é considerado o volume total de poros (Stefanidou,2010). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Análise de Microestrutura do DEC- FCT-UNL e a segurança, em termos do seu manuseamento, foi garantida através da realização do ensaio sempre a temperaturas inferiores a 21 °C. As amostras utilizadas provieram de fragmentos de provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão.

Estas amostras foram colocadas numa estufa, a 60 °C, durante uma semana e depois colocadas em sacos de plásticos bem fechados até ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

A primeira fase do ensaio consistiu em fragmentar as amostras, de modo a apresentarem uma dimensão de 5 cm³, dimensão que permitisse serem inseridas no penetrómetro (porta amostras do porosímetro). As amostras, depois de fragmentadas, foram colocadas numa estufa ventilada a uma temperatura de 40 °C, durante um período mínimo de 24 h (até obtenção de massas constantes, ou seja, variação de massa entre duas pesagens consecutivas inferior a 0.1 %) - figura 4.16.



Figura 4.16 – a) Amostras depois de fragmentadas para terem dimensões adequadas ao penetrómetro; b) conjunto de amostras na estufa ventilada.

As amostras foram retiradas da estufa e colocadas num exsicador durante 30 minutos, para arrefecerem, permanecendo num ambiente seco. Pesaram-se as amostras individualmente e colocaram-se na cápsula do penetrómetro do ensaio, envolvendo-se o bordo da cápsula com óleo de selagem – figura 4.17. Pesou-se o conjunto (amostra + penetrómetro) e introduziram-se os valores da massa do conjunto no programa de cálculo do aparelho (AutoPore 9500). De acordo com os valores de massa inseridos, o equipamento calcula o volume de mercúrio que é necessário introduzir em cada patamar. Introduziu-se o penetrómetro no equipamento e a amostra ficou sujeita a uma pressão de 100 µm de Hg; durante 5 minutos, foi introduzido mercúrio para preenchimento total da zona circundante da amostra. Iniciou-se o processo de intrusão, que se efectuou através da subida da pressão em 15 patamares pré-definidos entre 0,0138 MPa e 0,2068 MPa. O processo foi concluído com a redução da pressão no interior até à pressão atmosférica. De seguida, foi retirado o penetrómetro e procedeu-se à medição da massa do conjunto, terminando-se, assim, a análise com baixa pressão.

Na análise de alta pressão, introduziu-se o penetrómetro na respectiva porta. Reduziu-se a pressão até ao valor de 100 µm Hg e, durante 5 minutos, foi introduzido mercúrio que preencheu totalmente a zona circundante da amostra. Posteriormente iniciou-se a intrusão, com o aumento de pressão em 67 patamares de pressão, entre os valores de 0,2758 MPa e 206,8427 MPa. A extrusão de pressão ocorre utilizando 27 patamares, entre 206,8427 MPa e 0,1034 MPa. Seguidamente, o penetrómetro foi retirado e procedeu-se ao registo da massa do conjunto. No final, o computador

registou o volume de mercúrio introduzido. Em cada patamar de pressão, houve um tempo de espera de 30 segundos, na análise de alta pressão, e de 15 segundos, na análise de baixa pressão (Rato,2006).

Este ensaio foi realizado a todos os provetes prismáticos, com excepção dos provetes em que se procedeu à incorporação de fibras vegetais, por indisponibilidade de uso do equipamento.



Figura 4.17 – a) Porosímetro “Autopore IV” da Micrometrics; b) introdução da amostra no penetrómetro.

4.1.10 Caracterização química e mineralógica

A preparação das amostras e respectiva caracterização térmica e mineralógica foi realizada no Núcleo de Materiais Metálicos do Departamento de Materiais no LNEC.

As amostras ensaiadas são resultantes do ensaio de resistência à compressão. Estas amostras foram colocadas numa estufa, a 60 °C, e posteriormente guardadas em sacos de plásticos bem fechados (evitando, assim, a sua contaminação, bem como a evolução da cura) e transportadas para o LNEC.

4.1.10.1 Preparação de Amostras

Previamente aos ensaios, as amostras foram convenientemente preparadas. Em cada tipo de amostra, existia uma parcela solta, isto é, fragmentada, e outra parcela compacta (figura 4.18). A parcela fragmentada foi usada para obter a fracção fina (amostra mais concentrada na pasta da argamassa), enquanto a parcela compacta foi usada para obter a amostra global.

A amostra que estava fragmentada (resultante do ensaio de resistência à compressão) foi esquartelada, com o objectivo de abranger toda a granulometria, alcançando-se, por esta razão, uma amostra o mais representativa possível. Ela foi colocada numa folha branca e espalhada com o auxílio de uma espátula. Posteriormente, foi esquartelada e dividida em 8 partes iguais (à superfície, dispuseram-se os fragmentos de maiores dimensões e por baixo as partículas mais finas) (figura 4.19a). Com o auxílio de uma espátula, foram recolhidas 4 partes e colocadas no copo de gobelé

(figura 4.19b). Após o procedimento descrito, todas as amostras foram colocadas numa estufa, a uma temperatura de 60 °C, onde permaneceram durante 24 horas (figura 4.19c).

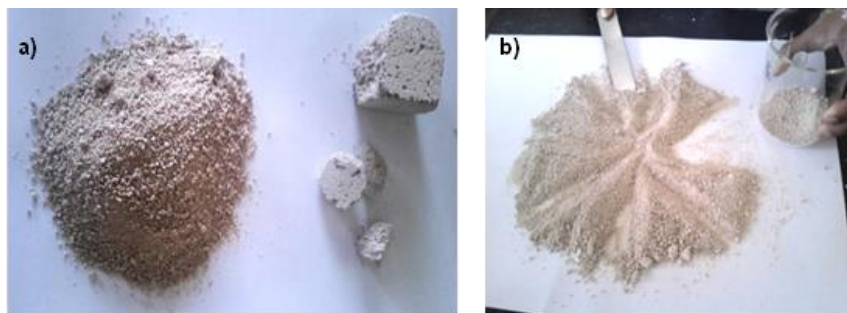


Figura 4.18 – Preparação das amostras: a) parcela solta e parcela compacta da mesma amostra; b) esquartejamento da amostra em 8 partes iguais.

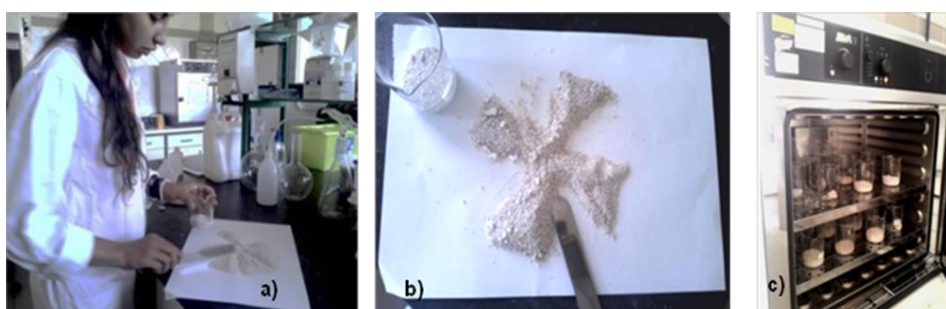


Figura 4.19 – a) e b) Recolha de quatro partes iguais da amostra para um copo de gobelé; c) provetes na estufa.

Cada amostra foi desagregada e sujeita a uma separação granulométrica, obtendo-se duas fracções diferentes:

- Amostra Global corresponde à fracção da amostra que foi previamente moída e cujas partículas passaram todas no peneiro de malha 106 μm ;
- Fracção Fina resulta dos finos da amostra, obtidos durante a desagregação, e que passam no peneiro de malha 75 μm . Trata-se duma amostra mais concentrada na pasta da argamassa.

- Amostra Global

A parcela compacta de cada amostra (pedaço de provete) foi moída com o auxílio de um almofariz e pilão cerâmicos, até que a totalidade passasse no peneiro de malha 106 μm (figura 4.20). Como resultado desta preparação, obteve-se a amostra global (ligante e agregados). Recorreu-se também a um pincel para auxiliar a passagem dos finos, porque, muitas vezes, estes obstruem a malha do peneiro, impedindo a passagem das restantes partículas. Por último, a amostra global foi colocada num saco de polietileno com a respectiva identificação. A amostra global foi utilizada no ensaio de DRX e no TG/dTG.

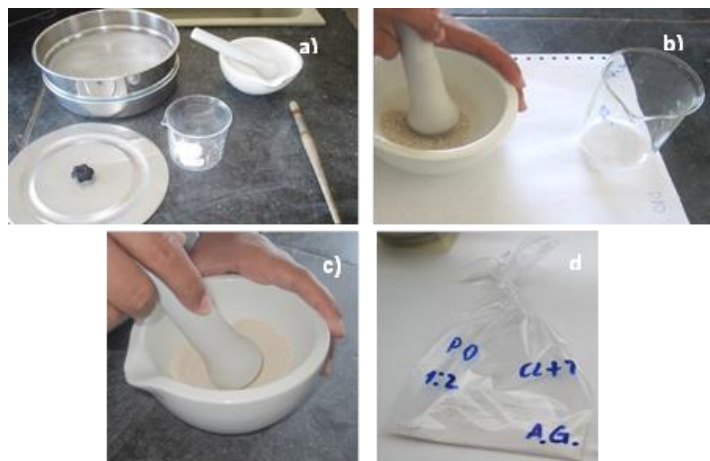


Figura 4.20 – Preparação da amostra global: a) material utilizado; b) e c) moagem da amostra ; d) identificação e armazenamento da amostra global.

-Fracção Fina

O material solto de cada amostra (figuras 4.21a e 4.21b) foi passado no peneiro de 75 μ m de abertura (figura 4.21 c e d), para recolher apenas a fracção fina, ou seja, o ligante. A opção da escolha do peneiro de 75 μ m em vez de 106 μ m, como é mais usual, prende-se com facto da cal aérea e da argila, presente na terra, terem ambas o papel de ligante na formulação da argamassa. Assim, pretende-se minimizar a influência da areia presente na terra. Depois de preparada a amostra, esta foi colocada num saco com a identificação de fracção fina. A fracção fina foi analisada no ensaio de DRX. O material que não passou no peneiro foi também guardado num saco de polietileno com a identificação de após fracção fina, na medida em que poderia vir a ser necessário para algum ensaio.

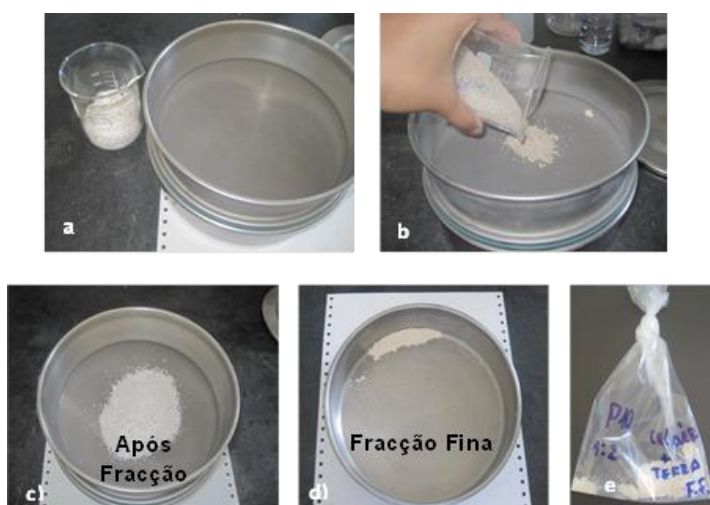


Figura 4.21 – Preparação da fracção fina: a) peneiro de malha 75 μ m e copo de gobelé com amostra solta; b) colocação da amostra no peneiro; c) e) fracções resultantes da peneiração; e) identificação e armazenamento da fracção fina.

Salientam-se ainda os cuidados a ter com o material em laboratório, evitando a contaminação (fracção fina e amostra global), no momento da preparação das diferentes amostras. Os peneiros utilizados devem ser cuidadosamente limpos: primeiramente são lavados com água destilada e depois sujeitos a um banho de ultrassons. O almofariz e respectivo pilão são limpos com ácido clorídrico e posteriormente lavados com água destilada, para garantir que não há nenhum tipo de contaminação. Estes são cuidados fundamentais e indispensáveis, repetidos ao longo da preparação das amostras.

4.1.10.2 Análise Mineralógica por Difracção de Raios X

A difracção de raios X é uma técnica não destrutiva que permite a análise qualitativa do material, ou seja, permite a identificação das fases minerais presentes na amostra. Este método é muito versátil e rápido de executar; contudo, não pode ser aplicado a minerais não cristalinos.

A partir das reflexões de raios X da amostra obtém-se informação sobre as fases cristalinas de um material (figura 4.22). Os raios X, ao incidirem numa substância com planos cristalinos, são difractados com a mesma energia com que incidiram, de acordo as condições da *Lei de Bragg*:

$$2 \times d \times \sin(\theta) = n \times \lambda$$

onde d [nm] corresponde à distância interplanar para o conjunto de planos cristalográficos paralelos, θ [°] é o ângulo de incidência dos raios X medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos, n [-] é um número inteiro corresponde à ordem da difracção e λ [Å] comprimento de onda da radiação incidente (Carneiro, 2012; Rhodes, 2006; Dias, 1999).

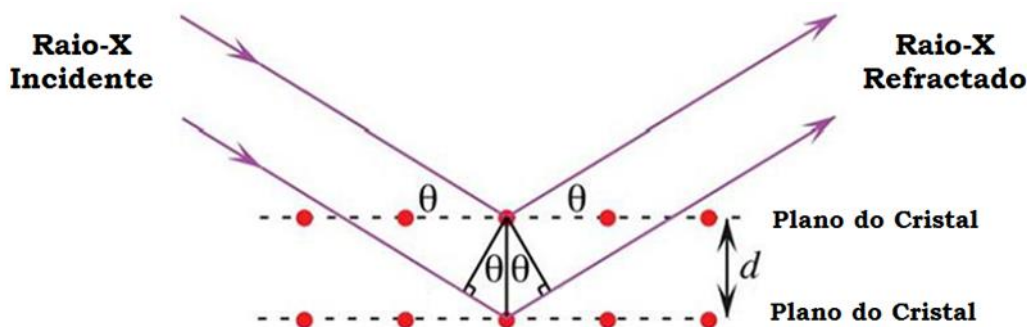


Figura 4.22 – Princípio de funcionamento da Difracção de Raios X (adaptado de Rhodes, 2006).

Aas amostras (fracção fina e amostra global) foram retiradas do saco, com auxílio de uma espátula e colocadas no porta-amostras do difractómetro de raios X. O enchimento foi realizado por camadas em que cada uma era compactada por um pilão (figura 4.23 e figura 4.24). Depois do enchimento, foi necessário aferir o nivelamento e regularização da superfície compactada, com o

auxílio de uma lâmina metálica, limpando-se o material em excesso, com recurso a um pincel. Posteriormente, a amostra foi colocada no difractómetro (figura 4.25).

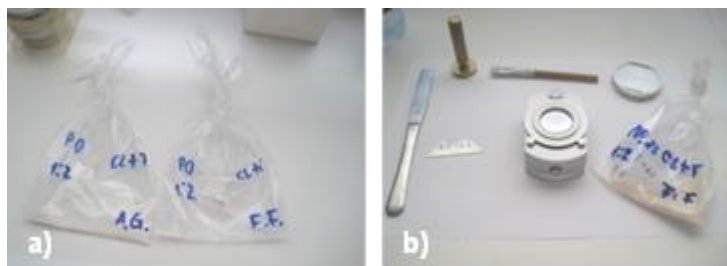


Figura 4.23 – a) Amostra global e fracção fina de cada tipo de amostra; b) material utilizado para preparação de amostras para o ensaio de DRX.



Figura 4.24 – a) e b) Enchimento do porta- amostras; c) nivelamento e regularização da superfície do porta- amostras com o auxílio de uma lâmina metálica.

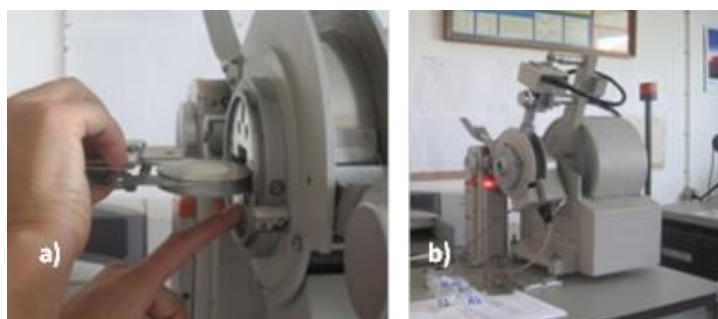


Figura 4.25 – a) Introdução da amostra porta-amstras no difractómetro; b) difractómetro Philips PW3710.

Para este ensaio, foi utilizado o difractómetro “Philips PW3710”, sujeito a uma tensão de 35 kV e corrente de 45 mA, com radiação $K\alpha$ de cobalto (comprimento de onda $\lambda=1.7903 \text{ \AA}$). O varrimento foi efectuado entre 3° e $74^\circ 2\theta$, com incrementos de $0,05^\circ 2\theta$ durante 1 segundo (Gameiro *et al.*, 2012). Cada ensaio demorou, em média, cerca de 25 minutos. O resultado do ensaio do DRX consiste num difractograma que regista os valores das reflexões dos raios X correspondentes aos diferentes planos dos compostos cristalinos presentes.

4.1.10.3 Análise termogravimétrica e análise termogravimétrica diferencial (TG-dTG)

Como complemento ao ensaio de difração de raios X, realizou-se a análise termogravimétrica (TG) e a análise termogravimétrica diferencial (dTG).

Estas análises incluem-se numa grande variedade de técnicas térmicas baseadas nas mudanças físicas e químicas que ocorrem na matéria em função da variação de temperatura (Ramachandran, 2002; Cizer et al., 2009). Na análise (TG) regista-se a variação da massa de uma amostra durante um aquecimento controlado, desde a temperatura ambiente até aos 1000°C. As variações de massa foram medidas por uma termobalança, SETARAM TGA 92. Essas variações são geralmente causadas pela remoção e libertação de compostos voláteis durante a decomposição de compostos sólidos. A velocidade de aquecimento foi constante e de 10 °C/min, desde a temperatura ambiente até cerca dos 1000°C (Santos-Silva, 2005). Como resultado do ensaio, obtém-se um gráfico (termograma ou curva termogravimétrica) que tem no eixo das abcissas a temperatura e, no eixo das ordenadas, o valor de variação de massa.

A análise termogravimétrica derivada corresponde à primeira derivada da curva TG. Nesta obtém-se “picos” de área proporcional à variação da massa, picos que permitem determinar com maior rigor as temperaturas de início e fim de perda de massa (Cruz et al., 2006; Marchetto, 2005).

Nas argamassas de cal aérea e terra verificam-se perdas de massa entre as seguintes gamas de temperatura:

- 350 a 500/550 °C - Neste patamar de temperaturas, ocorre a desidratação da portlandite;
- 500/550 a 850 °C- Neste patamar, verifica-se a descarbonatação dos carbonatos existentes.

Na realização do ensaio, utilizou-se 50 mg de pó da amostra global, que foi introduzida no cadinho de platina (recipiente metálico que é introduzido na termobalança) (Figura 4.26). Programou-se a velocidade de aquecimento de 10°C/min, desde 20° C até à temperatura final de 1000 °C, e deu-se início ao ensaio, que demorou cerca de 2,5 horas.



Figura 4.26 – Análise termogravimétrica: a) cadinho e pinça; b) colocação do cadinho na termobalança; c) termobalança SETARAM TGA 92.

4.2 Ensaios realizados sobre provetes em tijolo

Nas argamassas aplicadas sobre tijolo realizaram-se os ensaios de dureza superficial por durómetro shore A, de condutibilidade térmica e de velocidade de propagação de ultrassons. Foi avaliado ainda o comportamento face à água com absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten), ensaio de absorção de água por capilaridade e ensaio de secagem. Por último realizou-se o ensaio de porosimetria de mercúrio.

4.2.1 Dureza superficial por durómetro de Shore A

Este ensaio foi realizado tendo por base a norma ASTM D2240 (ASTM, 2000). A dureza superficial do reboco foi determinado através do durómetro de Shore A. Inicialmente, o durómetro foi desenvolvido para ser utilizado nos pneus (indústria automóvel), mas foi posteriormente aperfeiçoado e adaptado para poder ser utilizado em outros materiais com a escala de Shore A ou Shore D. Com efeito, o durómetro mede a resistência à penetração de um pino pressionado contra o material que se está a analisar. A unidade deste equipamento é graus Shore A e fornece valores compreendidos entre 1-100 graus Shore A. Antes da realização do ensaio, eliminaram-se os vestígios de material solto que pudesse falsear os resultados. Encostou-se o durómetro à argamassa aplicada nos provetes em suporte de tijolo e registou-se o valor obtido - figura 4.27. Repetiu-se a medição num total de 10 pontos diferentes da superfície de argamassa. O resultado final, em cada argamassa, corresponde à média dos valores obtidos e correspondente desvio-padrão.

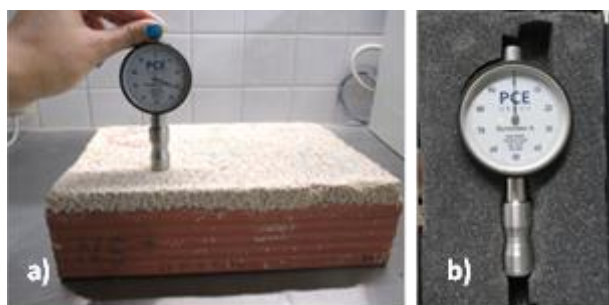


Figura 4.27 – a) Medição com o durómetro de Shore A; b) durómetro.

4.2.2 Condutibilidade Térmica

O ensaio da condutibilidade térmica da argamassa aplicada sobre suporte de tijolo realizou-se com o equipamento ISOMET 2104 (Heat Transfer Analyser) e a respectiva sonda de superfície API 210412. À semelhança do que já foi descrito na secção 5.1.1 para os provetes prismáticos, o tijolo foi

colocado sobre uma placa de poliestireno extrudido (XPS) e a sonda de superfície foi disposta sobre a camada de argamassa - figura 4.28. Seguidamente, registou-se o valor da condutibilidade térmica fornecida directamente pelo equipamento. Alterou-se a posição da sonda e repetiu-se o processo.

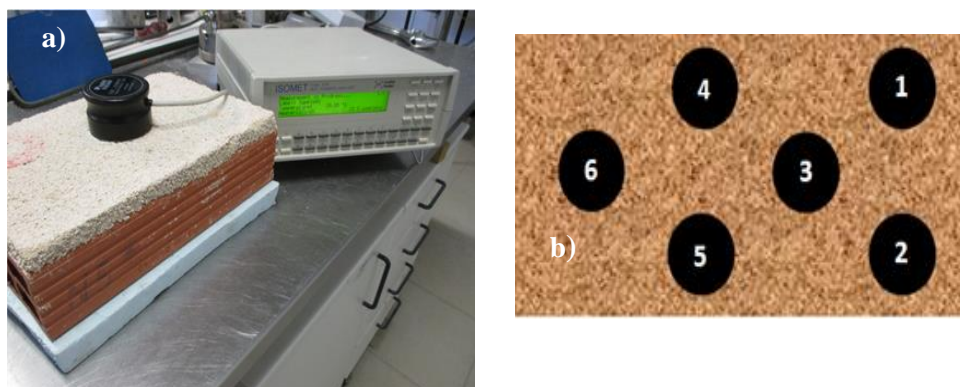


Figura 4.28 – a) Medição da condutibilidade térmica na argamassa aplicada sobre suporte tijolo; b) disposição da medição dos pontos.

4.2.3 Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio de propagação de velocidade de ultrassons foi realizado segundo ficha de ensaio do LNEC FE Pa 43 (2010). O objectivo do presente ensaio é determinar a compacidade das argamassas. Trata-se de uma técnica não destrutiva.

Este ensaio foi realizado com recurso a um emissor de ultrassons, tendo-se colocado um gel para melhorar o contacto entre a argamassa e os transdutores. Numa folha do tamanho do provete, marcaram-se 6 pontos (de A a F), colocou-se o transdutor emissor no ponto A e o transdutor receptor no ponto B e registou-se o valor do tempo decorrido. Foram feitas cerca de três leituras para cada combinação de pontos (A-B; A-C; A-E; A-F; F-B; F-C; F-E) - figura 4.29. Com valores de tempo decorridos entre os vários pontos e conhecidas as distância entre eles, foi possível determinar a velocidade de propagação de ultrassons, através da equação

$$v_{us} = \frac{d}{t}$$

onde v_{us} [m/s] é a velocidade de ultrassons, d [m] é a distância percorrida e t [s] corresponde ao tempo decorrido.

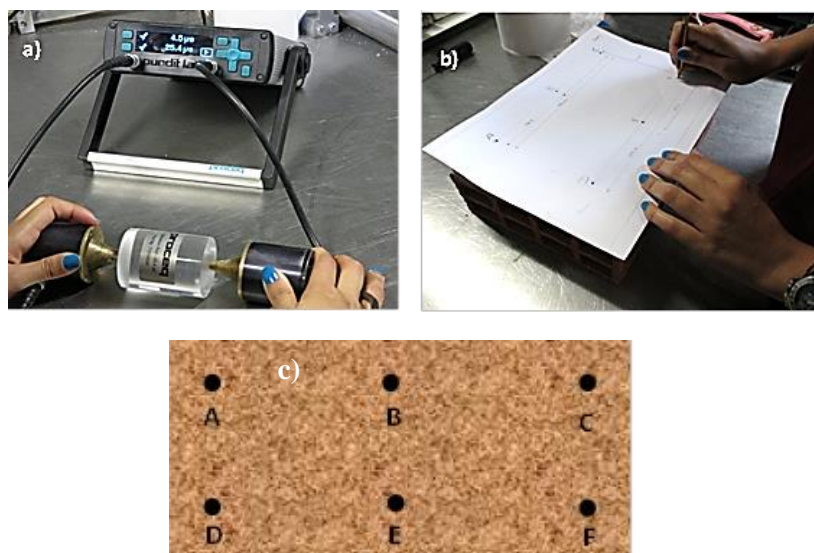


Figura 4.29 – a) Calibração do aparelho de ultrassons; b) marcação dos pontos a ensaiar; c) disposição dos pontos na argamassa.

4.2.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

O ensaio dos tubos de Karsten foi realizado em conformidade com o Test N.ºII.4 da RILEM (RILEM, 1980) e com a ficha de ensaio Fe Pa 39 (LNEC, 2002). Este ensaio permitiu avaliar a permeabilidade do material, ou seja, a sua capacidade de absorção sob baixa pressão. Assim, é determinado o volume de água absorvida pela argamassa durante um certo período de tempo (ou o tempo que demora a ser absorvido determinado volume de água), numa determinada área.

Foram colocados três tubos de Karsten distribuídos por cada tijolo. Foi realizado o ensaio em cada tubo Karsten, individualmente. Antes do ensaio mediram-se os diâmetros internos de cada tubo de Karsten. Envolveram-se as aberturas dos tubos com plasticina e comprimiram-se os tubos contra a argamassa aplicada sobre o tijolo; em redor do diâmetro exterior da abertura foi colocada mais plasticina, de modo a garantir a aderência de cada tubo de Karsten ao reboco. Os tubos estão graduados de 0 a 4 ml. Encheu-se o tubo até à marca 0 ml e cronometrou-se o tempo. Sempre que a água atingia a marca 4 ml, voltava a encher-se o tubo e anotava-se o tempo decorrido. Registou-se o volume de água absorvido aos 5, 10 e 15 minutos, ao longo dos 3 tubos. Durante a realização do ensaio a 1 ano de idade das argamassas, teve-se sempre o cuidado de garantir que a frente húmida no reboco não ultrapassava o interface entre metade da distância entre dois tubos - figura 4.30.

O resultado final, em cada ensaio, corresponde ao valor médio da quantidade de água absorvida em cada argamassa. O coeficiente de absorção no instante t é calculado pela seguinte expressão:

$$ca = \frac{w_{mt} \times 10^{-3}}{\varnothing^2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}}$$

onde ca [$kg/m^2\sqrt{min}$] é o coeficiente de absorção, W_{mt} [ml] corresponde à quantidade de água média absorvida em t minutos e ϕ [mm] é o diâmetro médio dos tubos de Karsten.



Figura 4.30 - Ensaio de absorção de água sob baixa pressão em argamassa aplicada no tijolo.

4.2.5 Ensaio de absorção de água por capilaridade e secagem

- Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade de uma camada de argamassa aplicada sobre um tijolo foi desenvolvido no âmbito da presente dissertação. O ensaio foi concretizado numa sala com condições controladas de temperatura e humidade relativa ($T=20\pm3^{\circ}C$ e $HR = 65\pm5\%$). Este ensaio tem como objectivo avaliar a resposta da argamassa aplicada sobre o tijolo sujeito à presença de água. Assim, é possível avaliar o comportamento do conjunto (argamassa + tijolo).

Antes do ensaio, mediu-se a largura e o comprimento da argamassa e a massa do conjunto. Por simplificação, optou-se por não envolver o tijolo com película de polietileno nas superfícies laterais. Para a realização do ensaio, preparou-se um tabuleiro de plástico que continha água no fundo. O tabuleiro foi sobre-elevado, para que ficasse na mesma altura que a balança e foi verificada a horizontalidade com o nível. Dentro do tabuleiro, são colocados apoios a fim de sobre-elevar a altura da base do tijolo. Coloca-se água no tabuleiro, de modo a garantir uma altura de lâmina de água de 5 mm a partir da base do tijolo. Junto à caixa plástica, e ao mesmo nível, é colocada uma balança de precisão de 0.01g. Nesta balança, é colocado um recipiente com água e uma garrafa de água com furos de pequenas dimensões, ao longo de todo o perímetro da base. O recipiente de água tem uma abertura lateral por onde sai uma mangueira e, pelo princípio dos vasos comunicantes, mantém a lâmina de água constante. Colocou-se uma caixa virada ao contrário sobre o tabuleiro com o tijolo e com água, para garantir um ambiente saturado-figura 4.31 e 4.32.

A medição da perda de água corresponde à água absorvida pelo sistema reboco e tijolo. Assim, com o auxílio de um cronómetro e da balança, regista-se a perda de massa ao longo do tempo, ou seja,

sempre que se verificava perda de massa, registava-se o tempo decorrido.

Este procedimento apresenta a vantagem de evitar os erros associados às sucessivas medições directas da massa do tijolo, ao longo dos sucessivos intervalos de tempo; com efeito, ao retirar o tijolo da água, teria de se escorrer a água em excesso e pesar o sistema.

Como é a primeira vez que o ensaio foi realizado, não existindo por isso termo de comparação, estabeleceu-se como critério de paragem o primeiro dos seguintes acontecimentos:

- O nível de água atinge o topo da argamassa

Ou

- A duração máxima do ensaio é de 2h.

Após a realização do ensaio, definiu-se como critério de paragem atingir a altura da frente húmida na argamassa.

A finalidade do ensaio foi determinar o coeficiente de capilaridade (CC) e poder comparar entre as diferentes argamassas aplicadas sobre o suporte de tijolo. Para além disto, foi possível traçar a curva de capilaridade em cada provete em tijolo. Naturalmente, o procedimento acima descrito pode ser melhorado, uma vez que se trata de uma primeira abordagem.

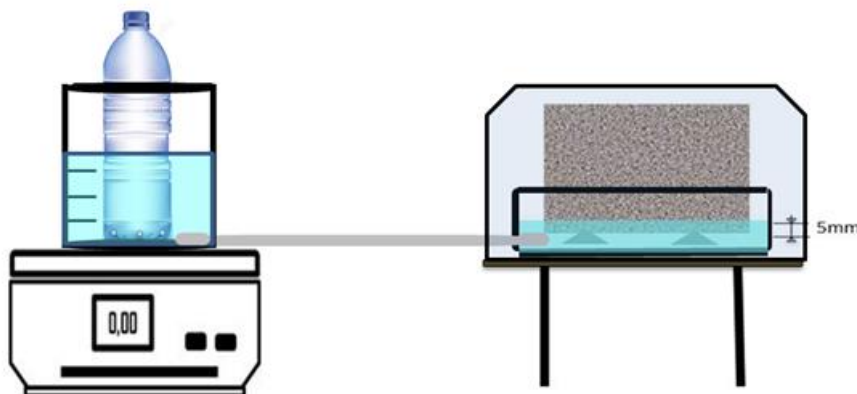


Figura 4.31- Esquema representativo do ensaio de absorção de água por capilaridade do conjunto (argamassa + tijolo).

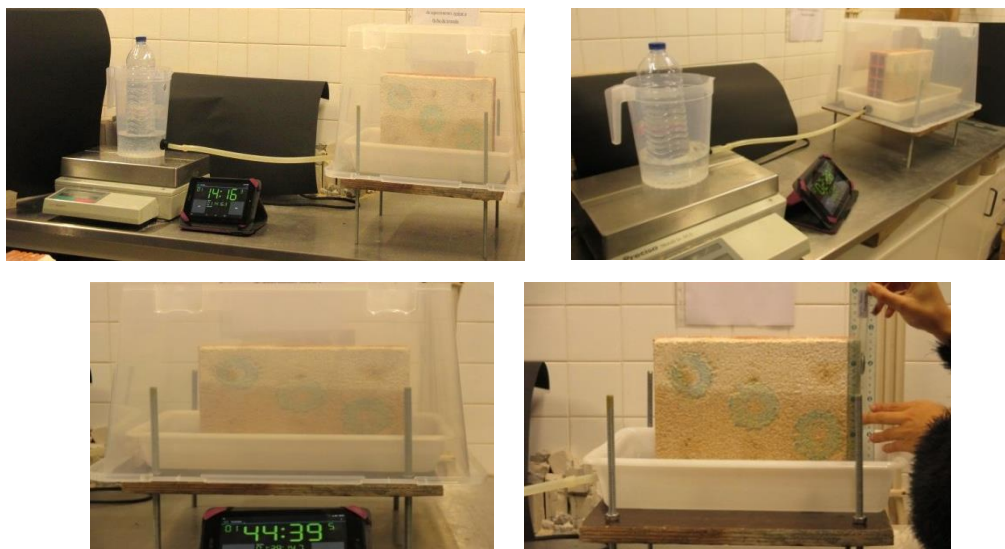


Figura 4.32- Ensaio de absorção de água por capilaridade no sistema (reboco+ tijolo).

- Ensaio de Secagem

O objectivo principal era avaliar o comportamento do conjunto (argamassa + tijolo) face à presença de água; no entanto, considerou-se relevante apresentar a secagem do conjunto durante as primeiras 24 h.

O ensaio de secagem decorreu na mesma sala condicionada onde se efectuou o ensaio de absorção de água por capilaridade (temperatura de 20 ± 2 °C e HR de 65 ± 5 %).

Após o ensaio de capilaridade, o provete em suporte de tijolo foi colocado sobre uma balança metálica com um pano húmido cujas dimensões eram as do conjunto (argamassa + tijolo) - figura 5.34. Durante a primeira hora do ensaio, registou-se o tempo decorrido cada vez que havia variação de massa. Seguidamente, registou-se a perda de massa a cada hora, até à 5ª hora, e, por fim, após 24 h.

Com este ensaio, foi possível traçar o gráfico do teor em água (Wt) em função do tempo e calcular a taxa de secagem (TS). Por simplificação, considerou-se que a área de secagem corresponde ao comprimento do tijolo pela altura da frente húmida na camada de argamassa.



Figura 4.33 – Ensaio de secagem na argamassa aplicada sobre suporte de tijolo.

4.2.6 Porosimetria por intrusão de Mercúrio

Este ensaio foi realizado como descrito no ponto 4.1.9. Neste caso concreto, foram retiradas amostras de cada argamassa sobre tijolo.

4.3 Ensaios realizados sobre Reboco no Murete de taipa

Foram realizados ensaios sobre os rebocos com 1 ano de idade, aplicados sobre o murete de taipa. Como anteriormente referido, o murete está dividido em 4 painéis nos quais foram aplicados quatro tipos de rebocos distintos: CL2; CL2_25t; CL3_10 (ArF) e CL3. Os rebocos aplicados encontram-se no exterior, orientados a nascente. Os ensaios sobre os rebocos realizaram-se no mês de Dezembro e no início do mês de Janeiro, período cujas condições atmosféricas se caracterizaram por elevada humidade relativa, vento e chuvas intensas (quadro 4.1). Não foram realizados ensaios sobre painéis de rebocos com fibras por não se ter atingido a idade de 1 ano durante a elaboração da presente dissertação.

Quadro 4.1- Ensaios de caracterização realizados sobre os rebocos

Objectivo	Tipo de Ensaio	Ensaio
Determinar as Propriedades Físicas e Mecânicas	Ensaios <i>in situ</i>	Dureza superficial por durómetro Shore A
		Resistência superficial por esclerómetro pendular
		Velocidade de propagação dos ultrassons
		Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten
		Termografia
		Tubos de Karsten
	Ensaios Laboratoriais	Porosimetria de mercúrio
		Resistência à compressão através do método de confinamento
		Absorção capilar por contacto

4.3.1 Dureza Superficial por durómetro de Shore-A

Este ensaio foi realizado de acordo com o disposto na norma ASTM D2240 (ASTM, 2000). A dureza superficial do reboco foi determinada através do durómetro de Shore A-figura 4.34. A dureza superficial foi medida como descrito no ponto 4.2.1, num total de 6 pontos por painel (por argamassa).

O resultado final em cada painel corresponde ao valor médio de 6 pontos medidos.



Figura 4.34 – Durómetro de Shore A.

4.3.2 Resistência Superficial por esclerómetro pendular

Este ensaio foi realizado com base na norma ASTM C805 (ASTM, 2008) e para a sua realização foi utilizado um esclerómetro, modelo Schmidt PM, indicado para ensaio de revestimentos e alvenarias de baixas resistências. Este equipamento contém uma massa conhecida que choca contra a superfície em estudo, resultante de uma reacção elástica por impulso. O seu funcionamento é baseado no ressalto. Segundo Malanho e Veiga (2010), a altura do ressalto é menor quanto mais brando for o material em estudo. A dureza da superfície em estudo é avaliada pela medição do deslocamento de retorno da massa conhecida contra a superfície.

Colocou-se o esclerómetro encostado ao reboco e libertou-se o pêndulo através do botão de disparo. Foi, naturalmente, necessário garantir também que o equipamento permanecia bem encostado ao reboco – figura 4.35. Realizaram-se as medições em diversos pontos do reboco. A dureza superficial em cada zona corresponde ao valor médio das várias medições efectuadas. A unidade do esclerómetro é graus Vickers.

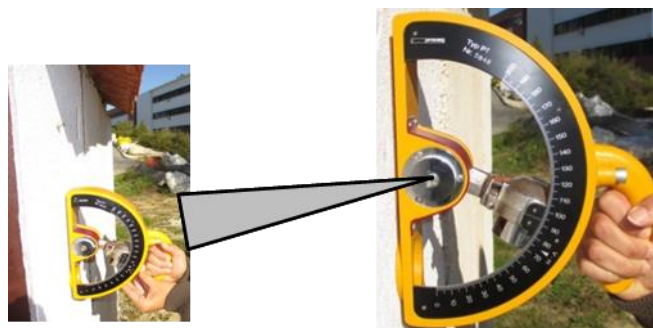


Figura 4.35 - Ensaio de dureza superficial (esclerómetro pendular).

4.3.3 Ensaio de Velocidade de propagação de ultrassons

O ensaio da velocidade de propagação dos ultrassons foi realizado com o mesmo equipamento referido no ponto 4.2.3

Marcaram-se 4 pontos (A,B,C e D) distanciados 5 cm, em três zonas de cada painel. Efectuaram-se medições entre os pontos AB, AC e AD. Depois de aplicado o gel condutor nas extremidades dos transdutores, colocou-se o transdutor emissor no ponto A e o transdutor receptor no ponto B, e mediu-se o valor de tempo decorrido. Seguidamente, mantendo o transdutor emissor no ponto A, colocou-se o transdutor receptor nos outros pontos - figura 4.36.

Para distâncias pequenas, admite-se que o percurso das ondas ultrassónicas ocorre apenas pelo reboco; em oposição, para distâncias longas, considera-se que os ultrassons podem atingir o suporte.



Figura 4.36 – a) Calibração do equipamento de medição de ultrassons; b) realização do ensaio no reboco.

4.3.4 Absorção de Água sob Baixa Pressão- Tubos de Karsten

A absorção de água sob baixa pressão foi realizada através de tubos de Karsten, como descrito no ponto 4.2.4. Colocaram-se 3 tubos em cada painel de reboco, um em cada nível - na zona da base, na parte intermédia e na parte de cima do painel - figura 4.37.

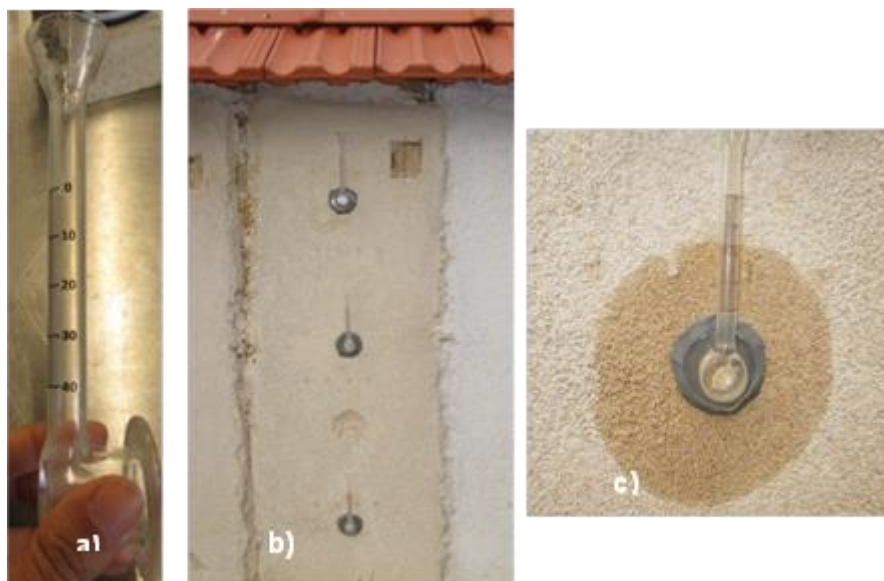


Figura 4.37- a) Tubo de Karsten ; b) tubos de Karsten aplicados no reboco do murete de taipa; c) pormenor do tubo de Karsten e da superfície do reboco após o ensaio.

4.3.5 Absorção de Água por Capilaridade por Contacto

Este ensaio foi realizado com base na EN 15801 (CEN, 2009) e segundo a ficha de ensaio Fe Pa 40 (LNEC, 2005). Foram recolhidas amostras irregulares do reboco aplicado no murete de taipa (CL2 e CL2_25t). De cada tipo de argamassa foram seleccionadas três amostras. Antes do ensaio, elas foram previamente limpas com um pincel, removendo, assim, as partículas soltas. Seguidamente, mediu-se a área da face da amostra que fica em contacto com a água, com o auxílio de uma folha de papel milimétrico. Nesta folha, delimitou-se o contorno da figura e determinou-se a área recorrendo a Autocad. Num segundo momento, iniciaram-se as pesagens: provete seco, cesto com tela e provete seco e por último o cesto com tela húmida e provete seco. Colocou-se o conjunto numa caixa sobre duas ripas, de modo a que a tela estivesse em contacto com 2 mm de água, ao longo de todo o ensaio. A caixa manteve-se fechada, a fim de manter as condições de humidade e de limitar a quantidade de água evaporada das amostras.

Este ensaio foi realizado numa sala climatizada ($T=20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ e $HR = 65 \pm 5\%$). A massa do conjunto é medida, de 5 em 5 minutos, até aos 40 minutos, e depois aos 60, 90, 180, 300, 480 e 1440 minutos – figura 4.38.

Com este ensaio, é possível determinar o coeficiente de capilaridade (CC) e traçar a curva de absorção de água por capilaridade. Esta curva, obtida num gráfico, apresenta, em ordenadas, a quantidade de água absorvida por área da base do provete (kg/m^2) e, em abcissas, a raiz quadrada do tempo ($\text{min}^{1/2}$). A quantidade de água absorvida (m) é expressa pela equação seguinte:

$$m = \frac{m_i - m_0}{A}$$

onde m [kg/m²] é a massa da quantidade de água absorvia, m_i [kg] é a massa do provete no instante t_i , m_0 [kg] é a massa do provete seco e A [m²] área da superfície do provete em contacto com a água.



Figura 4.38 - Ensaio de absorção de água por capilaridade por contacto: a) e b) conjunto (cesto + geotêxtil + amostra) no início do ensaio; c) caixa tapada com amostras.

4.3.6 Secagem

O ensaio de secagem para as amostras irregulares do reboco do murete de taipa foi também realizado numa sala de ambiente controlado ($T=20 \pm 3$ °C e $HR = 65 \pm 5$ %) no LNEC. Este ensaio foi concretizado segundo a ficha Fe Pa 40 (LNEC, 2005). A última pesagem do ensaio de capilaridade corresponde à pesagem no instante 0 minutos do ensaio de secagem. O conjunto (cesto + geotêxtil + amostra) é colocado em cima de ripas de vidro, numa bancada, na sala climatizada. Foram realizadas medições da massa do conjunto aos 30, 60, 90, 270, 450 e 1440 minutos e posteriormente de 24 em 24 horas, até ao estágio de massa constante (figura 4.39). Depois de realizado o ensaio, foi possível determinar a curva de secagem.

A curva de secagem relaciona o teor de água [%], em ordenadas, com o tempo [h], em abcissas. O teor de água (W_t) é obtido através da equação:

$$W_t = \frac{m_i - m_0}{m_i} \times 100\%$$

onde w_t [%] corresponde ao teor de água, m_i [kg] é a massa do provete instante i e m_0 [kg] é a massa do provete seco

Foi também determinada a taxa de secagem, TS, que corresponde ao declive horizontal do troço de recta inicial da curva de secagem.

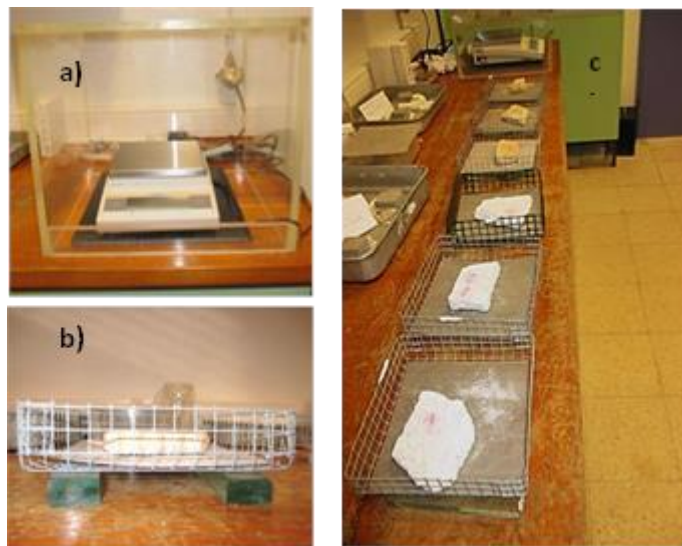


Figura 4.39 - a) Balança utilizada no ensaio; b) conjunto (cesto + geotêxtil + amostra) sobre 2 ripas de vidro numa bancada da sala climatizada; c) ensaio de secagem de todas as amostras.

4.3.7 Resistência à Compressão com argamassa de confinamento

As amostras recolhidas no murete de taipa foram sujeitas ao ensaio de resistência à compressão com argamassa de confinamento. O ensaio foi realizado de acordo com o descrito na ficha do LNEC FE Pa 42. Realizou-se uma argamassa de confinamento de cimento com traço volumétrico 1:3 (cimento: areia de rio), que foi aplicada na face irregular das argamassas recolhidas, com área de 40 mm x 40 mm e espessura de 10 mm. É, assim, possível garantir uma superfície plana igual à área da força de compressão (figura 4.40). Passados 28 dias de cura da realização da argamassa de confinamento, efectuou-se o ensaio de compressão. Para a realização deste ensaio, utilizou-se uma máquina de compressão universal EQE 89, com uma célula de carga de 2 kN e de 200 kN, sendo a velocidade da carga de compressão de 100 N/s, ou seja, sem choque. O software do equipamento regista o valor da força de compressão máxima (F_c). Deste modo, com o valor da força máxima aplicada (kN) a dividir pela área de aplicação do carregamento, neste caso, 40mm x 40mm, obtém-se a resistência à compressão de cada argamassa. Para cada argamassa recolhida do murete, existiam 3 amostras, o que permitiu determinar o valor médio da resistência à compressão de cada reboco aplicado sobre o murete.

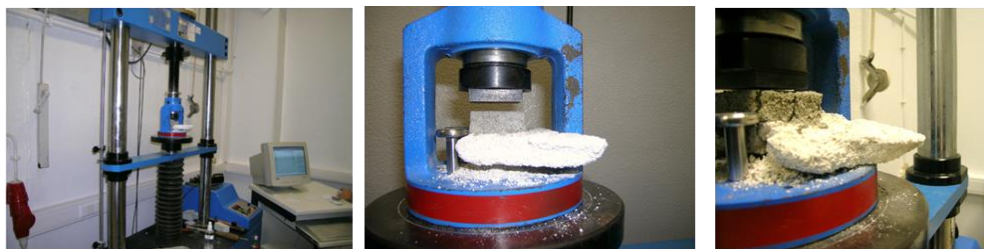


Figura 4.40 – Ensaio de compressão confinada.

Nos quadros 4.2 e 4.3 apresentam-se de uma forma sintetizada os ensaios realizados nos provetes prismáticos e nas argamassas aplicadas sobre tijolo e reboco do murete de taipa, respectivamente.

Quadro 4.2 – Síntese dos ensaios realizados nos prismas

	Ensaio	Provetes prismáticos	Idade
Caract. física e mecânica	Condutibilidade térmica	✓	1 ano
	Massa Volúmica aparente	✓	1 ano
	Resistência à tracção	✓	1 ano
	Resistência à compressão	✓	1 ano
	Absorção de água por capilaridade	✓	1 ano
	Secagem	✓	1 ano
	Porosidade aberta e massa volúmica	✓	1 ano
	Resistência aos sulfatos	✓	1 ano
Caract. química e mineralógica	Porosimetria de mercúrio	✓	90 dias e 180 dias / 1 ano
	Difracção de raios X (DRX)	✓	910dias e 180 dias / 1 ano

Quadro 4.3 – Síntese dos ensaios realizados nas argamassas aplicadas sobre o tijolo e no reboco do murete de taipa

Ensaio	Arg. sobre tijolo (1 ano)	Reboco do murete de taipa (1 ano)
Dureza superficial por durómetro de Shore A	✓	✓
Velocidade de propagação de ultrassons	✓	✓
Absorção de água sob baixa pressão - tubos de Karsten	✓	✓
Porosimetria de mercúrio	✓	✓
Condutibilidade térmica	✓	-
Capilaridade e secagem	✓	-
Capilaridade por contacto e secagem	-	✓
Resistência à superficial por esclerómetro pendular	-	✓
Resistência à compressão através do método de confinamento	-	✓
Termografia	-	✓

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 Generalidades

Neste capítulo apresenta-se a compilação dos resultados obtidos nas campanhas experimentais anteriores, aos 90 dias e 180 dias, dos autores mencionados na primeira parte deste trabalho (Jamú, 2013; Dias, 2013; Santos, 2014). Apresentam-se também os resultados obtidos pela autora da presente dissertação, a 1 ano de idade, bem como a análise de resultados com evolução da idade de cura, através da comparação com os trabalhos anteriormente realizados.

Em primeiro lugar, expõem-se os resultados no estado endurecido com os provetes prismáticos; de, seguida, dos provetes em tijolo e, por último, do reboco no murete de taipa. Os resultados físico-mecânicos obtidos com os provetes prismáticos são complementados com uma análise química e mineralógica. A informação é apresentada em forma de figuras e quadros, com o objectivo de permitir uma leitura simples e clara dos resultados.

5.2 Resultados da caracterização das argamassas no estado endurecido

Nesta secção analisa-se a evolução das argamassas ao longo do tempo, ou seja, discutem-se resultados das argamassas com 90 dias e 180 dias/ 1 ano de idade de cura. Este estudo permite, assim, observar as alterações nas propriedades das argamassas com a introdução de terra argilosa e de fibras vegetais. Os valores referentes a cada argamassa correspondem ao valor médio, no mínimo, resultante de três provetes em cada ensaio.

5.2.1 Provetes prismáticos

5.2.1.1 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica é uma propriedade intrínseca dos materiais e representa a capacidade de um material homogéneo se deixar atravessar pelo calor. Quanto maior for a facilidade de transferência de calor de um material, maior será a sua condutibilidade térmica. Apesar de nos provetes prismáticos o sensor não ficar totalmente em contacto com o provete, uma vez que a largura das faces é inferior à sua, não se quis deixar de apresentar os resultados do ensaio, válidos para comparação entre diferentes argamassas analisadas através do mesmo tipo de provetes. No quadro 5.1 apresentam-se os valores médios e os desvios da condutibilidade térmica, λ , de todas às argamassas às idades de 90 dias e 180 dias/ 1ano. A evolução da condutibilidade térmica com o aumento da idade de cura encontra-se retratada na figura 5.1.

Quadro 5.1 - Valores médios e desvios padrão da condutibilidade térmica

Argamassa	λ [W/mk]					
	90 dias		180 dias		1 ano	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	0,74	0,01	-	-	0,77	0,03
CL2_10t	0,77	0,10	-	-	0,72	0,03
CL2_25t	0,73	0,01	-	-	0,73	0,05
CL2_25t_1FV	0,55	0,04	0,64	0,04	-	-
CL2_25t_0,5FV	0,59	0,02	0,68	0,03	-	-
CL2_50t	0,69	0,04	-	-	0,79	0,09

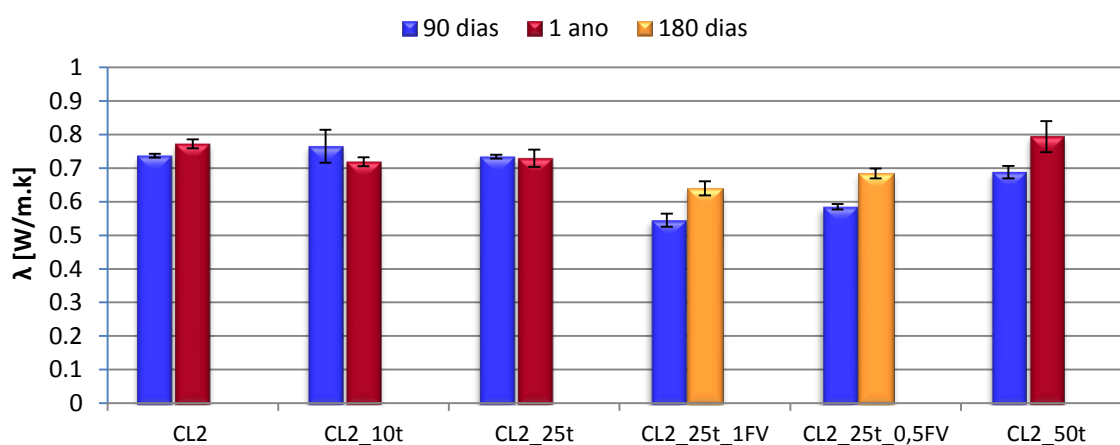


Figura 5.1 - Evolução da condutibilidade térmica dos provetes prismáticos aos 90 dias e 180 dias/ 1 ano.

Ao analisar o gráfico de barras da figura 5.1 é possível verificar que, aos 90 dias de idade de cura, o valor da condutibilidade térmica da argamassa com 10% de terra é superior, em relação à argamassa de referência (sem adição de terra). No entanto, para 25% e 50% de terra, obtêm-se valores de λ inferiores à da argamassa de referência. Também nas argamassas com fibras vegetais se verifica uma diminuição da condutibilidade térmica comparativamente às argamassas de referência ou à argamassa com a mesma percentagem de terra, 25%, mas em fibras. Como é possível observar, a introdução de fibras nas argamassas é uma medida vantajosa no que ao isolamento térmico diz respeito. Adicionalmente, constata-se que, aos 90 dias de idade, a argamassa com o maior teor de terra (50%) foi a mais vantajosa de todas sem fibras no que se refere a esta propriedade.

Com a evolução da idade de cura, os dados mostram que, globalmente, existe uma tendência para o aumento dos valores da condutibilidade térmica, excepto nas argamassas sem fibras com 10% e 25% de terra. De facto, a argamassa com 10% de terra apresenta uma diminuição no valor de λ dos 90 dias para 1 ano; diminuição tal que o valor obtido é inferior ao da argamassa de referência. Por outro lado, no período em apreço a argamassa com 25% de terra manteve constante o seu valor de condutibilidade térmica. Já as argamassas com 25% de terra e com incorporação de fibras vegetais

continuam a mostrar-se como as mais vantajosas, pois são de todas as que têm menor valor de λ e, por outro lado, quanto maior é a percentagem de fibras introduzidas, menor é o valor desta propriedade.

Contrariamente ao ocorrido aos 90 dias, a 1 ano de idade a argamassa com 50% de terra foi a que mostrou o valor mais elevado de λ .

O valor de condutibilidade térmica mencionado no ITE50 do LNEC (Pina dos Santos e Matias, 2006) para argamassas e rebocos de cal e areia é de 0,8 W/(m.k), valor que é muito semelhante ao valor obtido com a argamassa de referência nos provetes prismáticos com 90 dias e 1 ano de idade (0.74 e 0.77 W/(m.k), respectivamente).

No entanto, a aplicação de argamassas em rebocos correntes apresenta uma espessura de cerca de 2 cm, espessura para a qual as pequenas diferenças de λ encontradas são pouco significativas em termos de contribuição para o comportamento térmico das paredes onde vão ser aplicadas.

5.2.1.2 Massa volúmica aparente

As variações dimensionais dos provetes foram realizadas aos 7, 28, 90 dias e 1 ano de idade de cura para todas as argamassas, excepto para as argamassas com fibras vegetais, cujas últimas medições foram realizadas também aos 180 dias. A determinação das varrições dimensionais e ponderais dos provetes poderá não estar totalmente correcta, uma vez que os provetes mostraram ser muito friáveis. Durante a medição com a craveira, verificou-se a perda de material dos provetes prismáticos.

Apesar da incerteza associada ao ensaio optou-se por apresentar os resultados obtidos na tentativa de compreender a evolução da massa volúmica aparente.

No quadro 5.2 encontram-se os valores médios da massa volúmica dos provetes prismáticos a várias idades, bem como os respectivos desvios padrão.

Quadro 5.2 – Massa volúmica aparente dos provetes prismáticos

Argamassa	MV [kg/m ³]									
	7 dias		28 dias		90 dias		180 dias		1 ano	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	1757,3	51,24	1678,63	23,64	1694,3	21,58	-	-	1690,3	45,3
CL2_10t	1749,65	16,67	1702,95	18,2	1701,1	19,91	-	-	1678,1	28,1
CL2_25t	1784,13	34,6	1683,88	15,63	1763,35	20,81	-	-	1664,4	52,03
CL2_25t_1FV	1628,21	10,93	1562,39	9,61	1559,07	18,59	1550,28	27,58	-	-
CL2_25t_0,5FV	1580,05	68,04	1601,36	14,15	1597,8	12,86	1609,27	27,58	-	-
CL2_50t	1700,27	24,07	1666,8	18,8	1678,26	10,41	-	-	1640,5	38,29

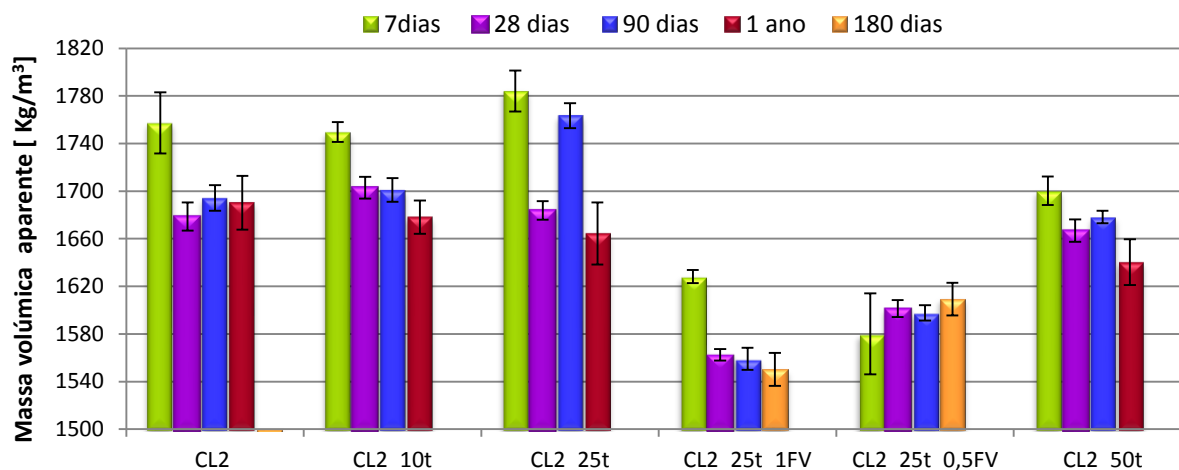


Figura 5.2 - Evolução com a idade da massa volúmica aparente em provetes prismáticos.

De acordo com a figura 5.2, de uma forma geral as argamassas apresentam uma diminuição de massa volúmica dos 7 para os 28 dias. Esta diminuição está associada à perda de água inicial por parte das argamassas, ou seja, devido à secagem da água utilizada para a amassadura.

Genericamente, dos 28 para os 90 dias verifica-se um aumento da massa volúmica das argamassas. Em boa verdade, no processo de cura das argamassas, verifica-se um aumento de massa e de volume das partículas sólidas. Justifica-se este aumento com a reacção de carbonatação, uma vez que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) com densidade de 2.21 g/cm^3 e massa molar de 74 g/mol , na presença de dióxido de carbono, dá origem a carbonato de cálcio (CaCO_3) com densidade de 2.71 g/cm^3 e massa molar de 100 g/mol .

Com a evolução da idade de cura dos 90 dias para 1 ano de idade, verifica-se novamente uma diminuição da massa volúmica dos provetes prismáticos. Este facto é possivelmente justificado pela estabilização da taxa de carbonatação. Já nas argamassas com incorporação de fibras vegetais, dos 90 para os 180 dias, constata-se que a argamassa com a dosagem máxima de fibras (CL2_25t_1FV) mostra uma diminuição da massa volúmica. Contudo, o mesmo não acontece para a argamassa com metade da dosagem máxima de fibras, que apresenta um ligeiro aumento.

De entre todas as argamassas, a de referência é a que possui a maior massa volúmica, e no lado oposto, isto é as de menor massa volúmica, tem-se as argamassas com incorporação de fibras vegetais.

5.2.1.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) indica se a argamassa em estudo é pouco ou muito deformável. Assim, quanto maior for a deformabilidade da argamassa, menor será o seu módulo de elasticidade dinâmico. Uma argamassa deformável detém a capacidade de acompanhar os movimentos do suporte onde está aplicada, sem fendilhar. A título de exemplo, para os suportes antigos, que

naturalmente são mais deformáveis, é adequada a aplicação de argamassa com maior deformabilidade, isto é, com baixo módulo de elasticidade. A argamassa mais favorável depende sempre do tipo de suporte no qual irá ser aplicada. O módulo de elasticidade dinâmico indica também a resistência mecânica da argamassa. Com efeito, as argamassas devem possuir alguma resistência mecânica; no entanto, não devem exceder a do suporte.

O quadro 5.3, regista os valores médios e os desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico, E_d , de todas às argamassas com as idades de 90 dias e 180 dias/ 1ano. A evolução dos valores do módulo de elasticidade dinâmico nas argamassas dos 90 dias para 180 dias/ 1 ano encontra-se representada na figura 6.3.

Quadro 5.3 - Valores médios e desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico

Argamassa	Ed [MPa]					
	90 dias		180 dias		1 ano	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	2902	97	-	-	3172	45
CL2_10t	2914	84	-	-	2816	54
CL2_25t	2662	69	-	-	2689	95
CL2_25t_1FV	1624	53	1703	59	-	-
CL2_25t_0,5FV	1933	67	1863	100	-	-
CL2_50t	2229	180	-	-	1860	161

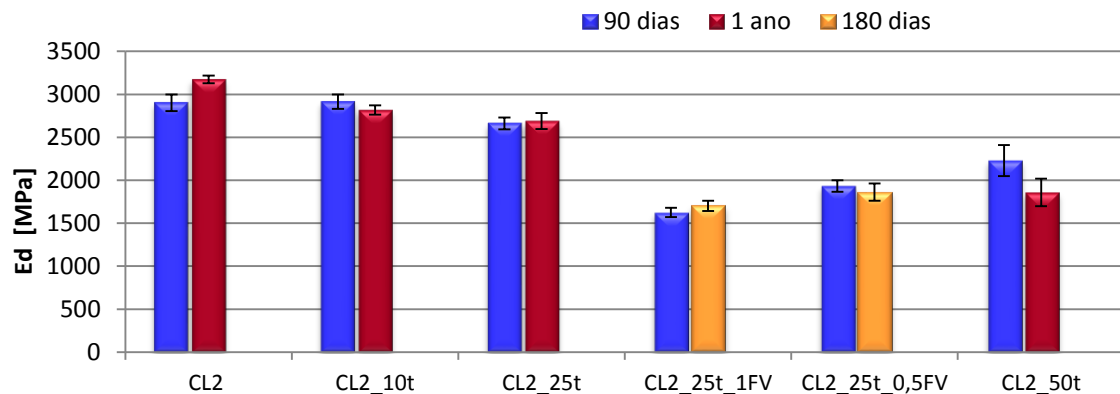


Figura 5.3 - Evolução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas dos provetes prismáticos aos 90 dias e 180 dias/ 1 ano.

A análise da figura 5.3 permite observar a evolução dos valores de E_d , em função da percentagem de terra adicionada em substituição da massa de cal aérea. A comparação é efectuada tendo como referência a argamassa sem terra (CL2). De uma forma global, as argamassa com mais terra incorporada indicam ser mais deformáveis. Tanto aos 90 dias como a 1 ano de idade, as argamassas com 25% e 50% de terra incorporada (CL2_25t e CL2_50t) apresentam módulos de

elasticidade mais baixos. Pode ainda constatar-se que o Ed a 1 ano de idade exibe valores iguais ou inferiores aos do Ed aos 90 dias, com excepção da argamassa de referência. Dos 90 dias para 1 ano de idade a argamassa sem incorporação de terra apresenta um aumento do seu valor do módulo de elasticidade, indicando, assim, uma menor deformabilidade. A argamassa com 25% de terra e com a dosagem máxima de fibras (CL2_25t_1FV) mostra, como expectável, um aumento do valor de Ed dos 90 dias para os 180 dias, o que torna a argamassa menos deformável. Por outro lado, a argamassa CL2_25t_0.5 FV segue a linha de evolução global das argamassas, evidenciando uma diminuição do valor de Ed com evolução da idade dos 90 dias para 180 dias. Verifica-se, comparativamente às argamassas sem fibras, que a introdução de fibras origina uma diminuição do Ed em todas as idades (90 e 180 dias).

Evidentemente, o módulo de elasticidade dinâmico de uma argamassa de terra é inferior ao de argamassas mistas de cal aérea e terra.

O tipo de terra seleccionada influencia os resultados. Segundo Gomes (2013), as argamassas de terra com menor percentagem de argila apresentam o valor de Ed maior (na ordem dos 560 MPa) enquanto que, nas argamassas com maior quantidade de argila o valor de Ed é inferior (na ordem dos 100 MPa). A terra com maior percentagem de argila referida na tese de doutoramento de Gomes (2013) é a utilizada nas argamassas mistas na presente dissertação. A argila fornece maior coesão, maior deformabilidade e, naturalmente, menor Ed. Considerando que as presentes argamassas poderão ser utilizadas em paredes de terra (como a taipa e adobe, por exemplo) e na reabilitação de edifícios antigos, não é benéfico que estas possuam módulo de elasticidade elevado. As argamassas em estudo apresentam-se muito mais adequadas quando compradas, por exemplo, com argamassas de cimento, de traço volumétrico de 1:4 (areia: cimento) que têm um valor de Ed na ordem dos 9000 MPa (Faria e Henriques, 2004).

De acordo com o quadro proposto por Veiga et al. (2010), as argamassas para aplicação em edifícios antigos devem apresentar valores de Ed superiores a 2000 MPa e inferiores a 5000 MPa. Apenas a argamassa com 50% de terra (CL2_50t) possui valor de Ed de 1860 MPa, que é abaixo de 2000 MPa, mas não é muito inferior. Ressalva-se ainda que a gama de valores de Ed é indicativa e não eliminatória.

5.2.1.4 Resistência à tracção

Os valores da resistência à tracção por flexão, respeitantes à argamassa de referência (CL2 a) e às argamassas mistas de cal aérea e terra (com e sem adição de fibras), encontram-se expostos na figura 5.4. Nessa figura mostra-se ainda a evolução dos valores médios da resistência dos 90 dias para 1 ano de idade e dos 90 dias para os 180 dias, em relação às argamassas mistas sem fibras e com a incorporação de fibras, respectivamente. O quadro 5.4 regista os valores médios e desvios padrão da resistência à tracção, R_t , de todas as argamassas às idades de 90 dias e 180 dias/ 1ano.

Quadro 5.4 - Valores médios e desvio padrão da resistência à tracção.

Argamassa	Rt [MPa]					
	90 dias		180 dias		1 ano	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	0,33	0,02	-	-	0,38	0,01
CL2_10t	0,35	0,02	-	-	0,31	0,03
CL2_25t	0,31	0,02	-	-	0,29	0,03
CL2_25t_1FV	0,16	0,02	0,16	0,01		
CL2_25t_0,5FV	0,20	0,01	0,18	0,01		
CL2_50t	0,24	0,01	-	-	0,21	0,02

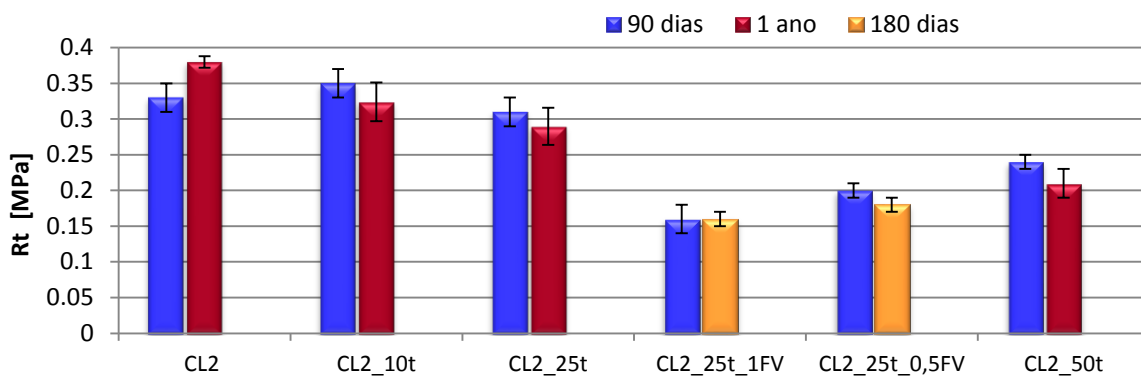


Figura 5.4 - Evolução da resistência à tracção das argamassas dos provetes prismáticas aos 90 dias e 180 dias/ 1 ano de idade.

Da análise da figura 5.4 conclui-se que a Rt diminui com a idade, em todas argamassas, com excepção da argamassa de referência, CL2, que apresenta um aumento da resistência Rt dos 90 dias para 1 ano e da argamassa com 25% de terra na qual foi adicionada a dosagem máxima de fibras vegetais (CL2_25t_1FV), que se manteve aproximadamente constante dos 90 para os 180 dias. No entanto, se for considerado o desvio padrão, os valores de Rt da argamassa (CL2_25t_1FV) dos 90 para os 180 dias diminuem.

Aos 90 dias, é possível verificar que a Rt diminui, com a introdução de terra argilosa. Esta situação já era expectável, uma vez que está a substituir-se, parcialmente, um ligante por uma argila (terra argilosa). Por outro lado constata-se ainda que a introdução de fibras (CL2_25t_1FV e CL2_25t_0,5FV) provoca uma diminuição da Rt, isto em comparação com a mesma argamassa sem fibras.

A argamassa CL2_10t apresenta o maior valor de Rt (0.35 MPa) aos 90 dias de cura em oposição às argamassas CL2_50t, que apresentam o valor mais baixo (0.24 MPa). A 1 ano de idade, a argamassa de referência, CL2, foi a que apresenta o maior valor de Rt.

Todas as argamassas sem fibras cumprem os requisitos de resistência à tracção para a aplicação em rebocos interiores e exteriores propostos por Veiga et al. (2010), uma vez que os valores de R_t estão compreendidos entre a gama de 0.2-0.7 MPa. No entanto, de acordo com aqueles critérios, nenhuma das argamassas se adequa ao refechamento de juntas. As argamassas com fibras têm valores de R_t iguais ou inferiores a 0.2 MPa. As argamassas com a dosagem máxima de fibras têm valores médios de R_t de 0.16 MPa, enquanto as argamassas com metade da dosagem máxima têm resistências mais elevadas (valores médios entre os 0.18 e 0.20 dos 90 para os 180 dias) e próximas da gama de valores sugerida por Veiga et al. (2010).

Nas figuras 5.5 e 5.6 mostram-se os valores de módulo de elasticidade dinâmico e de resistência à tração por flexão, para cada uma das argamassas em apreciação.

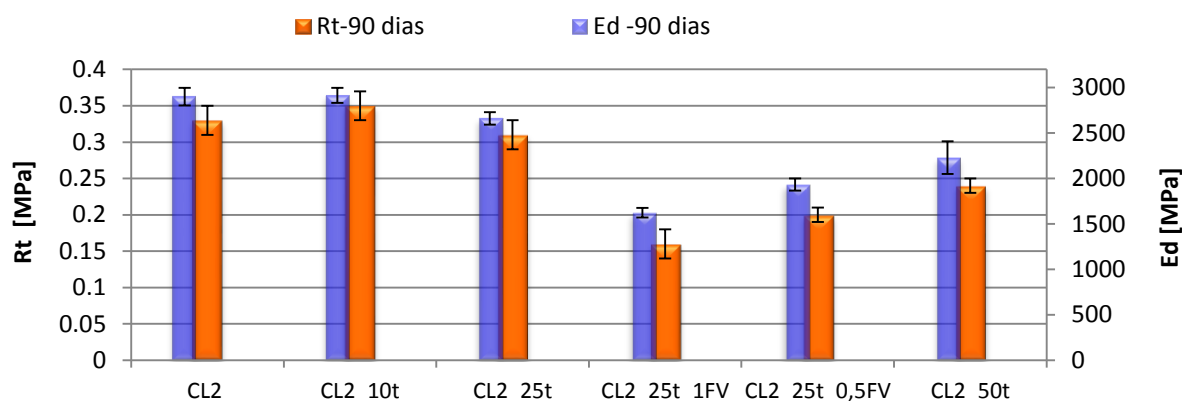


Figura 5.5 - Resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias.

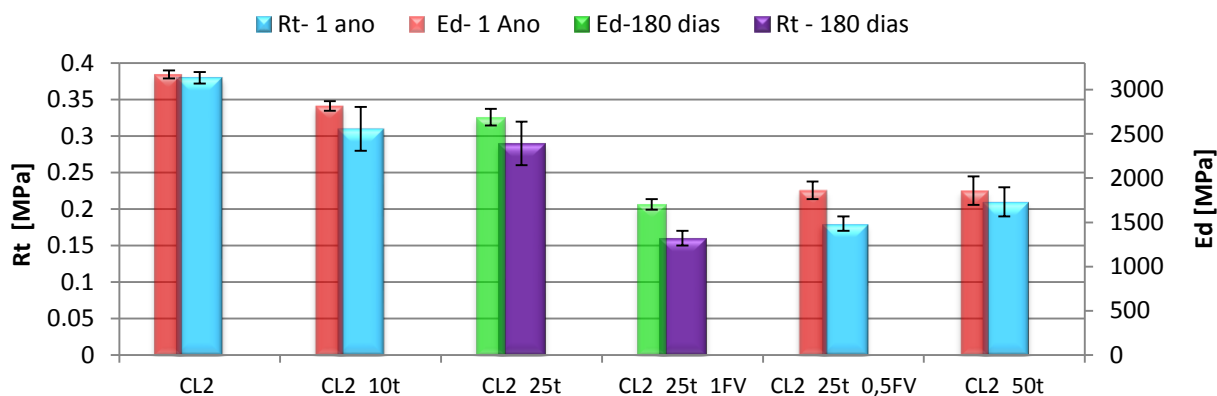


Figura 5.6 - Resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico aos 180 dias/1 ano.

De acordo com as figuras 5.5 e 5.6, de uma forma geral, verifica-se que as argamassas com maior E_d apresentam maior R_t . Aos 90 dias a argamassa CL2_10t ostenta maior E_d e simultaneamente maior valor de R_t ; no extremo oposto encontra-se a argamassa mista com adição máxima de fibras

vegetais (CL2_25t_1FV) que apresenta o valor de Ed e Rt mais baixo. Em idades mais avançadas, 180 dias e 1 ano, a evolução do Ed corresponde também à evolução de Rt. A 1 ano de idade a argamassa de referência (CL2) apresenta maior valor de Ed e conjuntamente valor de Rt mais elevado. À semelhança do que ocorreu aos 90 dias, aos 180 dias a argamassa CL2_25t_1FV tem o menor valor de Ed e de resistência à tracção (Rt).

5.2.1.5 Resistência à compressão

O quadro 5.5 regista os valores médios e desvios padrão dos valores de resistência à compressão, Rc, de todas as argamassas às idades de 90 dias e 180 dias ou 1 ano. Na figura 5.7 pode ser consultada a evolução de Rc de todas as argamassas, em função da idade.

Quadro 5.5 - Valores médios e desvio padrão da resistência à compressão

Argamassa	Rc [MPa]					
	90 dias		180 dias		1 ano	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	0,70	0,14	-	-	0,68	0,04
CL2_10t	0,72	0,02	-	-	0,66	0,02
CL2_25t	0,57	0,03	-	-	0,54	0,03
CL2_25t_1FV	0,43	0,01	0,44	0,02	-	-
CL2_25t_0,5FV	0,44	0,01	0,44	0,01	-	-
CL2_50t	0,51	0,04	-	-	0,41	0,06

Analisando o quadro 5.5 e a figura 5.7, conclui-se que a resistência à compressão diminui com a introdução de terra argilosa. Os valores de Rc da argamassa de referência são da mesma ordem de grandeza dos 90 dias para 1 ano. Aos 90 dias, a argamassa com 10% de terra (CL2_10t) apresenta o valor mais elevado de Rc, enquanto as argamassas com 25% de terra e com adição de fibras são as que têm os valores de resistência à compressão mais baixos. Aos 180 dias/ 1ano, regista-se um comportamento idêntico ao revelado aos 90 dias; contudo, a argamassa com maior Rc é a argamassa padrão, e a argamassa com 50% de terra argilosa é a que tem o menor valor de Rc. Salienta-se o facto de as argamassas com fibras manterem valores de Rc similares, com a evolução da idade.

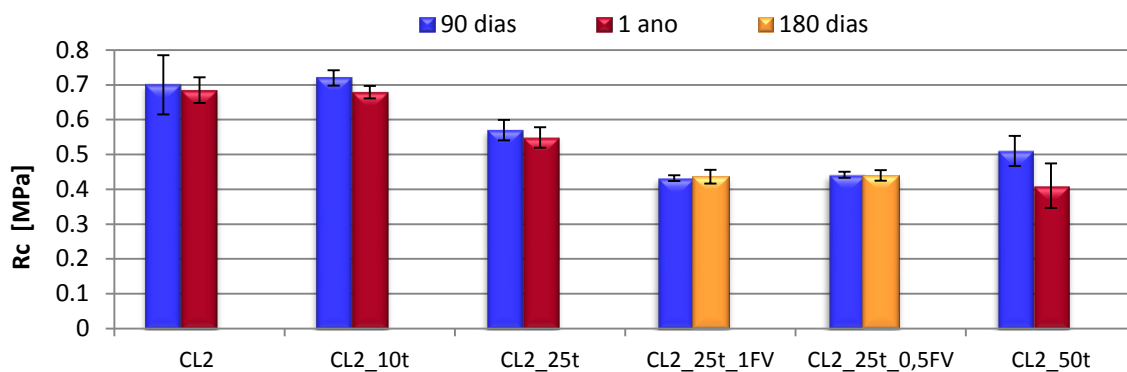


Figura 5.7 - Evolução da resistência à compressão das argamassas dos provetes prismáticos aos 90 dias e 180 dias/ 1 ano de idade.

Nas figuras 5.8 e 5.9 apresentam-se os valores de resistência à compressão e de resistência à tracção para as mesmas argamassas. Verifica-se que os valores das resistências (R_c e R_t) acompanham a mesma tendência. Aos 90 dias, as resistências mecânicas aumentam com a introdução de 10% de terra e diminuem quando se acrescenta maior percentagem de terra; contudo, não só a substituição do ligante por argila faz diminuir as resistências mecânicas, pois a introdução de fibras nas argamassa mistas (com 25% de terra) também piora a R_t e R_c , sendo por isso pernicioso. Ao analisar a figura 5.7, constata-se que, de uma forma global, as argamassas apresentam uma diminuição das resistências com a substituição do ligante por percentagens cada vez maiores de terra argilosa.

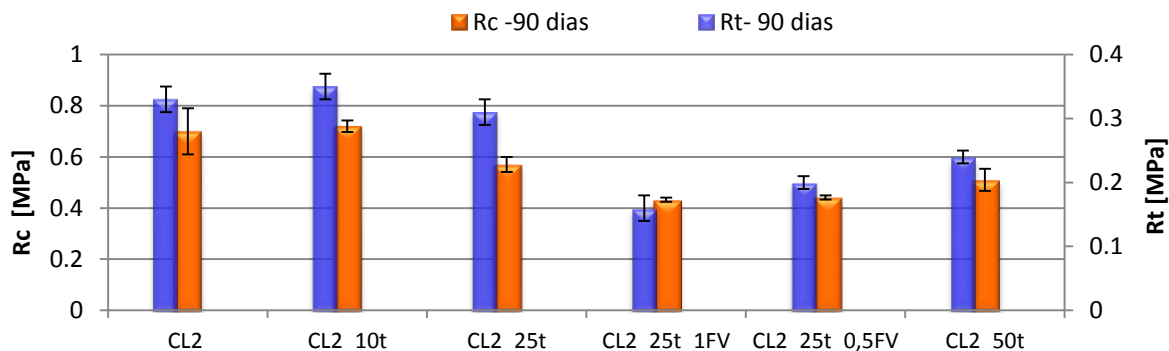


Figura 5.8 - Resistência à compressão e tracção aos 90 dias nos provetes prismáticos.

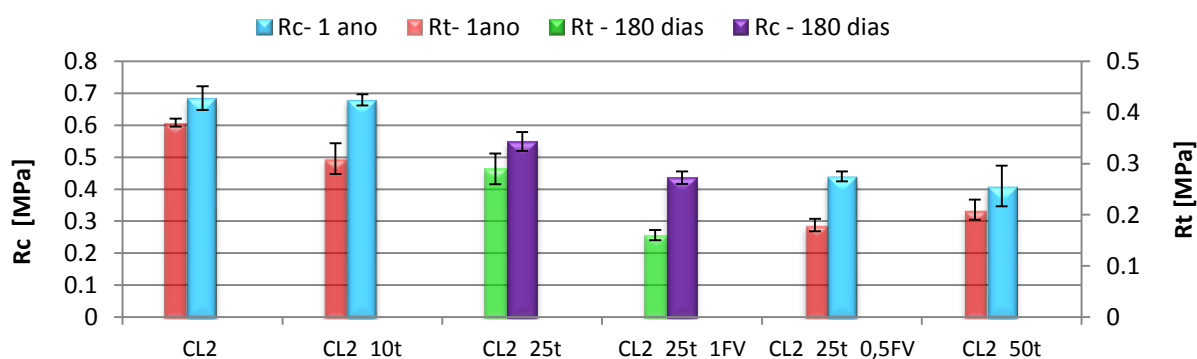


Figura 5.9 - Resistência à tracção e compressão aos 180 dias / 1 ano nos provetes prismáticos.

As figuras 5.10 e 5.11 mostram que, analogamente à resistência à tracção, também a resistência à compressão acompanha a mesma tendência de evolução do módulo de elasticidade dinâmico. Existe, assim, uma boa correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão. Em termos gerais, os valores de resistência à compressão estão de acordo com a gama e valores referidos por Veiga et al. (2010), uma vez que os valores de resistência à compressão são sempre superiores a 0.4 MPa e inferiores a 2.5 MPa.

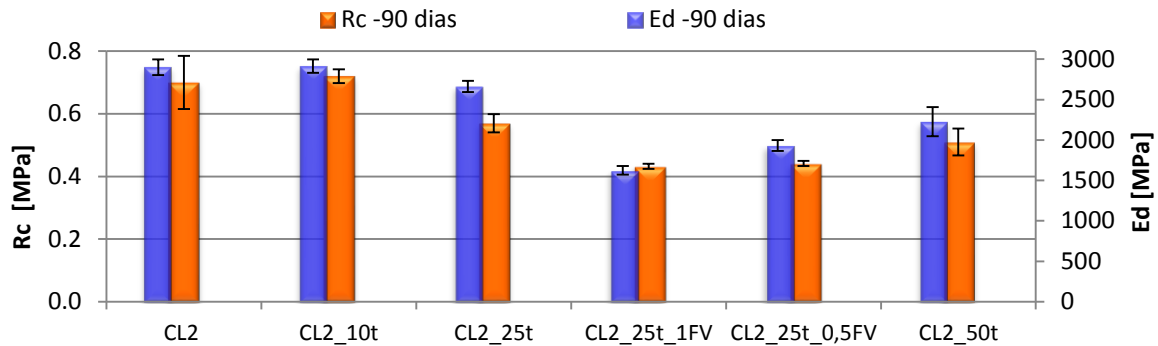


Figura 5.10 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias.

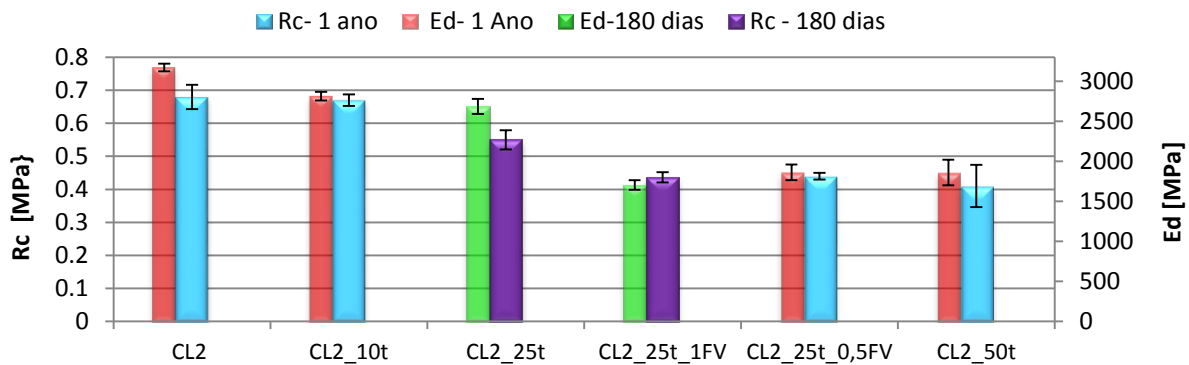


Figura 5.11 - Resistência à tracção e módulo de elasticidade dinâmico aos 180dias/ 1ano.

5.2.1.6 Absorção de água por capilaridade

Depois de serem traçadas as curvas de absorção de água por ascensão capilar em cada argamassa, e efectuada a respectiva análise, é possível obter dois parâmetros: o coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (VA). O CC é obtido através do declive da recta do troço inicial da curva de absorção de água e traduz a velocidade inicial da absorção de água em cada argamassa. O VA corresponde à quantidade máxima de água absorvida pela argamassa. Assim, os dois parâmetros mencionados são importantes na avaliação do comportamento da argamassa na presença de água como, por exemplo, água do terreno. Globalmente, são benéficas argamassas que tenham baixos

valores de CC e VA, isto é, menor velocidade de absorção de água e simultaneamente absorvam a menor quantidade total de água.

No quadro 5.6, registam-se os valores médios e os desvios-padrão do coeficiente de capilaridade (CC) e do valor assintótico (VA) de todas as argamassas.

Quadro 5.6 - Valores médios e desvio padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico

Argamassa	Capilaridade											
	90 dias				180 dias				1 Ano			
	CC [Kg/m ² .mim ^{1/2}]		VA [Kg/ m ² .h]		CC [Kg/m ² .mim ^{1/2}]		VA [Kg/ m ²]		CC [Kg/m ² .mim ^{1/2}]		VA [Kg/ m ²]	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	3,78	0,18	19,68	0,65	-	-	-	-	3,38	0,46	18,35	0,22
CL2_10t	3,24	0,17	20,25	0,60	-	-	-	-	3,01	0,44	17,07	0,51
CL2_25t	3,70	0,17	20,94	0,27	-	-	-	-	3,02	0,17	16,76	0,11
CL2_25t_1FV	4,80	0,20	22,32	0,70	4,56	0,11	21,85	1,25	-	-	-	-
CL2_25t_0,5FV	4,70	0,11	22,68	0,51	4,56	0,17	20,12	0,35	-	-	-	-
CL2_50t	4,42	0,01	19,49	0,35	-	-	-	-	4,17	0,47	17,12	0,68

As curvas do ensaio de capilaridade para cada argamassa, aos 90 dias, 180 dias/ 1 ano, encontram-se traduzidas nas figuras 5.12 e 5.13. Pela análise destas figuras constata-se que as argamassas apresentam inicialmente um comportamento em relação à água muito próximo; no entanto, a quantidade máxima de água absorvida é notoriamente diferente. Como espectável, a quantidade máxima de água absorvida é maior nas argamassas com fibras vegetais (CL2_25t_1FV e CL2_25t_0.5FV). Só interpretando o CC e o VA é possível tirar conclusões mais precisas.

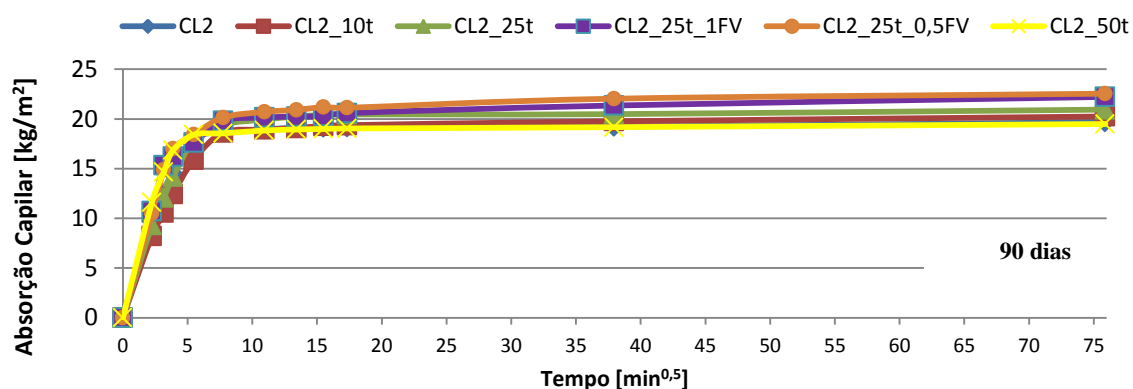


Figura 5.12 - Curvas de capilaridade de todas as argamassas aos 90 dias

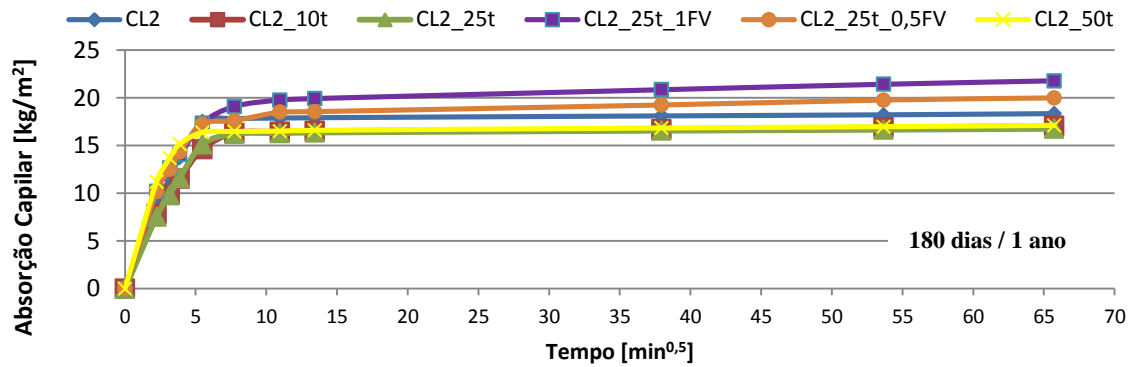


Figura 5.13 - Curvas de capilaridade de todas as argamassas (aos 180 dias para as argamassas com fibras e a 1 ano para as restantes).

A fim de mostrar toda a informação de forma clara e objectiva, os valores médios do CC e VA de todas as argamassas são apresentados em gráficos de barras. Na figura 5.14, pode ser consultada a evolução dos valores de CC, em todas as idades. Todas as argamassas têm maiores valores de CC, aos 90 dias, decrescendo com a evolução da idade, ou seja, aos 180 dias para argamassas com 25% de terra e com fibras vegetais e a 1 ano para as restantes argamassas. É de registar também a diminuição do valor de CC quando se procede à introdução de 10% de terra, destacando-se, assim, a vantagem de usar esta argamassa.

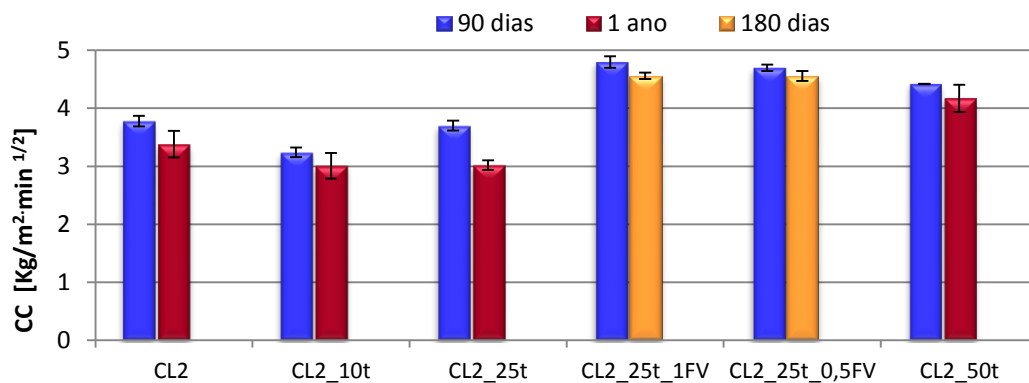


Figura 5.14 - Evolução do coeficiente de capilaridade de todas as argamassas nos provetes prismáticos.

Salienta-se, pela negativa, que as argamassas mistas com 25% de terra e com a adição de fibras vegetais (CL2_25t_1FV e CL2_25t_0.5 FV) apresentam os maiores valores de coeficiente de capilaridade (figura 5.14). Verifica-se que, quanto maior for a quantidade de fibras introduzidas, maior será o valor de CC, como pode ser comprovado pela análise do gráfico relativo às argamassas mistas com metade da dosagem máxima de fibras (CL2_25t_0.5 FV) e com dosagem máxima de fibras adicionada (CL2_25t_1FV).

A evolução dos valores de VA em todas as argamassas pode ser consultada na figura 5.15. Observa-se que, aos 90 dias, os valores de VA variam pouco, sendo muito semelhantes entre si, na ordem dos 20 kg/(m².h). Aos 90 dias, a argamassa que revela ligeira vantagem é a argamassa com 50% de terra, uma vez que apresenta menor VA. Com a evolução da idade, o VA diminui em todas as argamassas, quer aos 180 dias, quer a 1 ano de idade. A adição de fibras vegetais na argamassa mista com 25% de terra leva a um grande acréscimo do valor assintótico aos 90 dias, apesar de haver um pequeno decréscimo dos 90 para os 180 dias. Estas são as argamassas que apresentam o comportamento mais indesejado, dado registarem valores maiores VA. De um modo geral, o aumento da percentagem de terra introduzida não conduz a uma grande variação do valor assintótico.

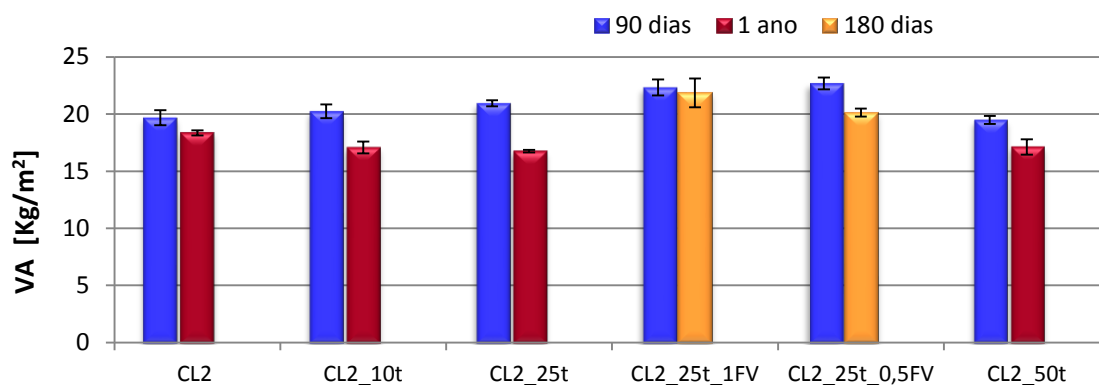


Figura 5.15 - Evolução do valor assintótico de todas as argamassas nos provetes prismáticos.

5.2.1.7 Secagem

A análise da curva de secagem permite obter dois parâmetros: a taxa de secagem (TS) e o índice de secagem (IS). A TS corresponde ao declive, com a horizontal, da recta do troço inicial da curva de secagem; traduz a velocidade inicial de secagem de cada argamassa. O IS corresponde à evolução da secagem global. Estes parâmetros são importantes para a avaliação do comportamento das alvenarias face à presença de água. Comummente, as argamassas mais favoráveis são aquelas que têm maiores valores de TS e menores valores de IS. Em suma, são desejáveis argamassas com elevada velocidade de secagem inicial e globalmente com maior facilidade de secagem.

No quadro 5.7 registam-se os valores médios e os desvios-padrão da TS e IS de todas as argamassas.

Quadro 5.7 - Valores médios e desvio padrão da taxa de secagem e índice de secagem

Argamassa	90 dias				180 dias				1 Ano			
	TS [kg/(m ² .h)]		IS [-]		TS [kg/(m ² .h)]		IS [-]		TS [kg/(m ² .h)]		IS [-]	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	0,36	0,01	0,20	0,02	-	-	-	-	0,23	0,01	0,19	0,01
CL2_10t	0,33	0,01	0,20	0,01	-	-	-	-	0,20	0,03	0,19	0,01
CL2_25t	0,33	0,06	0,22	0,03	-	-	-	-	0,25	0,01	0,16	0,01
CL2_25t_1FV	0,33	0,02	0,16	0,01	0,10	0,02	0,33	0,04	-	-	-	-
CL2_25t_0,5FV	0,31	0,03	0,15	0,02	0,07	0,01	0,35	0,02	-	-	-	-
CL2_50t	0,39	0,01	0,18	0,01	-	-	-	-	0,27	0,02	0,17	0,02

Nas figuras 5.16 e 5.17 podem ser consultadas as curvas de secagem de todas as argamassas às idades de 90 dias e 180 dias/ 1 ano.

Aos 90 dias, as argamassas sem fibras apresentam um comportamento semelhante entre si; por outro lado, as argamassas com fibras vegetais (CL2_25t_1FV e CL2_25t_0,5FV) têm curvas de secagem muito próximas das apresentadas pelas argamassas sem fibras.

Analogamente ao que acontece aos 90 dias também em idades mais avançadas as curvas de secagem da argamassa de referência e das argamassas mistas (com 1 ano de idade) são semelhantes. Este facto permite concluir que a introdução de percentagens de terra não modifica, de uma forma relevante, a secagem das argamassas com base em cal aérea analisadas. Só a análise da taxa de secagem e do índice de secagem poderão revelar resultados mais conclusivos.

Aos 180 dias de cura (figura 5.17) as argamassas mistas com fibras apresentam diferenças nas curvas de secagem, principalmente na primeira fase da secagem, em que a argamassa mista de cal e terra com a incorporação de metade da dosagem de fibras vegetais revela uma secagem mais lenta. No entanto, a partir das 72 h, a velocidade de secagem da argamassa CL2_25t_0,5FV aumenta e a partir desse instante as duas argamassas com fibras passam a ter um comportamento semelhante.

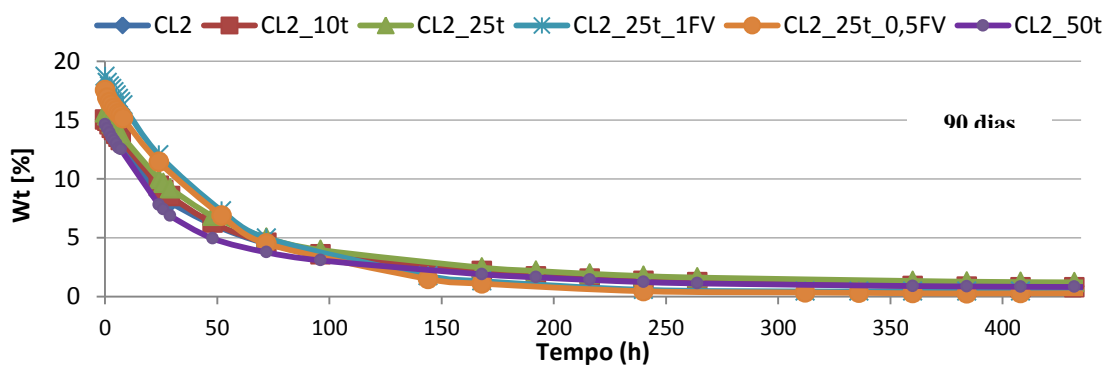


Figura 5.16 - Curvas de secagem de todas as argamassas aos 90 dias.

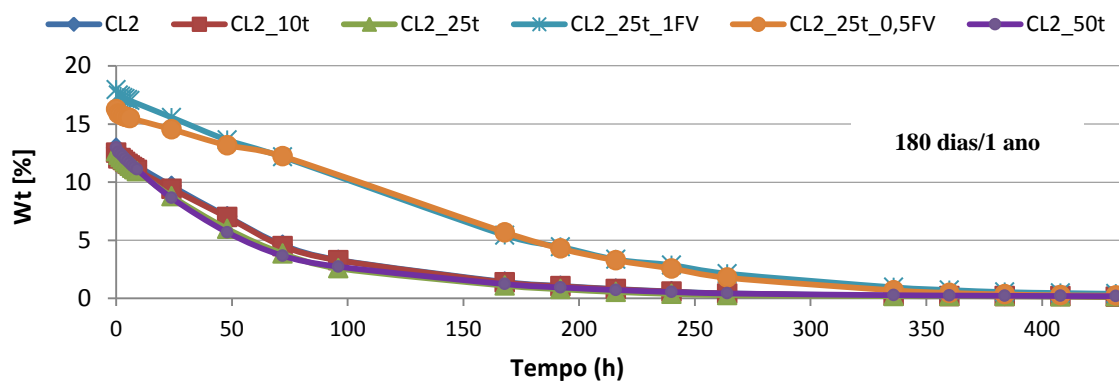


Figura 5.17 - Curvas de secagem de todas as argamassas (aos 180 dias para as argamassas com fibras e a 1 ano para as restantes).

Na figura 5.18, pode ser consultada a evolução da TS com a idade de todas as argamassas. Uma análise global permite concluir que a TS decresce em todas as argamassas. Aos 90 dias, os valores da taxa de secagem diminuem com a adição de terra, mantendo-se o mesmo valor de TS ($0.33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), independentemente da percentagem de terra adicionada. No entanto, a argamassa com 50% de terra assume valores superiores aos da argamassa de referência. A argamassa com a dosagem máxima de fibras apresenta o mesmo valor de TS das argamassas com 10% e 25% de terra; porém, a argamassa mista com a introdução de metade da dosagem máxima de fibras evidencia uma diminuição do valor de TS.

Com 1 ano de idade, a TS da argamassa com 10% de terra diminui em relação à argamassa de referência. Para as restantes dosagens de terra (25% e 50%), verifica-se um aumento da TS, com valores superiores à argamassa de referência.

A 1 ano a argamassa CL2_50t (com 50% de terra) destaca-se claramente pelo seu maior valor de TS comparativamente com as argamassas com o mesmo tempo de cura. Aos 180 dias, as argamassas com fibras apresentam uma enorme diminuição da TS em relação aos 90 dias; contudo, mantêm a mesma tendência, ou seja, a argamassa mista (de cal aérea e terra) com a dosagem máxima de fibras (CL2_25t_1FV) apresenta maior valor que a argamassa com metade da dosagem máxima (CL2_25t_0.5 FV).

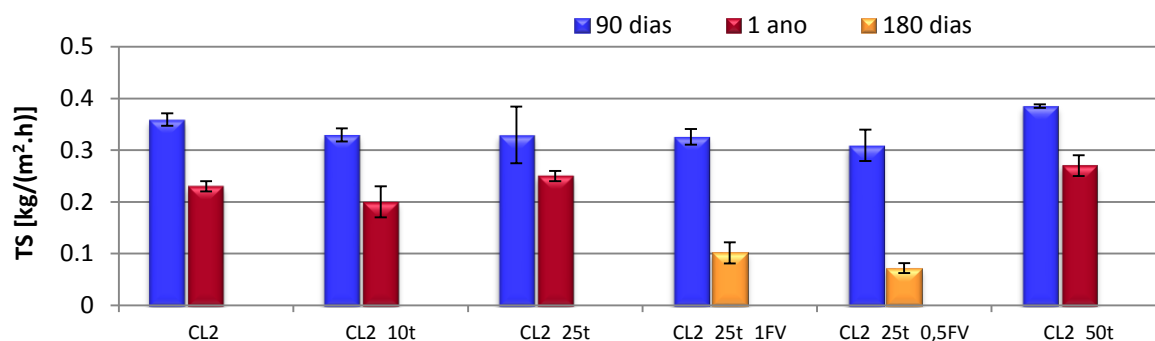


Figura 5.18 - Evolução da taxa de secagem de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias/1 ano.

A evolução do índice de secagem para as argamassas pode ser consultada na figura 5.19. A sua análise permite constatar a diminuição de IS ao longo do tempo, excepto para as argamassas mistas com fibras vegetais.

Aos 90 dias os valores do IS diminuem progressivamente com o aumento da percentagem de terra. No entanto, a argamassa com 25% de terra contraria esta tendência, uma vez que obteve o valor mais elevado, superior ao IS da argamassa de referência. Também aos 90 dias as argamassas mistas têm valores muito semelhantes entre si; no entanto, inferiores aos das argamassas sem fibras com a mesma percentagem de terra, traduzindo-se numa maior facilidade de secagem global. Após 1 ano de cura a argamassa com 10% de terra tem o mesmo valor do IS da argamassa de referência, seguindo-se a argamassa com 50% de terra. Por último a argamassa com 25% terra têm o menor valor de IS. As argamassas com 25% de terra e fibras (CL2_25t_1FV e CL2_25t_0.5FV), aos 180 dias, contrariam a tendência de evolução das restantes argamassas, apresentando maiores valores do IS com a idade. De facto, verifica-se um elevado aumento do IS com a evolução da idade, revelando uma maior dificuldade de secagem (maiores valores de IS).

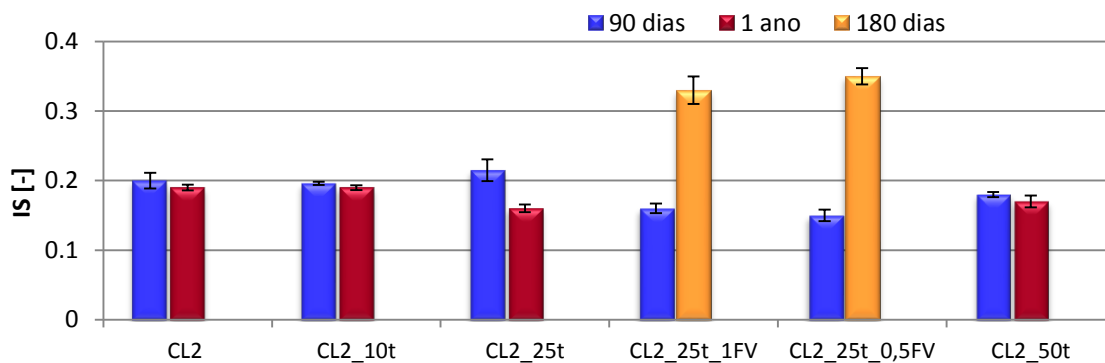


Figura 5.19 - Evolução do índice de secagem de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias / 1 ano.

5.2.1.8 Porosidade aberta e massa volúmica

A porosidade aberta (Pab) e a massa volúmica (MV) foram determinadas a partir do ensaio que consiste em proceder a pesagens hidrostáticas. A Pab de uma argamassa corresponde à quantificação por percentagem do volume de poros ligados ao exterior. No quadro 5.8 podem ser consultados os valores médios e os desvios padrão da Pab e a MV de todas as argamassas, aos 90 dias e 180 dias / 1 ano.

Quadro 5.8 - Valores médios e desvios padrão dos valores de porosidade aberta e massa volúmica pelo método hidrostático

Argamassa	90 dias				180 dias				1 Ano			
	P_{ab} [%]		MV [Kg/m ³]		P_{ab} [%]		MV [Kg/m ³]		P_{ab} [%]		MV [Kg/m ³]	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP
CL2	29,42	0,80	1593,51	17,75	-	-	-	-	22,81	0,12	1812,47	11,53
CL2_10t	30,93	0,41	1559,78	7,91	-	-	-	-	21,96	0,16	1807,52	2,49
CL2_25t	30,31	0,61	1575,58	21,67	-	-	-	-	22,47	0,18	1794,75	10,15
CL2_25t_1FV	36,93	2,35	1256,23	25,83	26,31	0,62	1552,38	27,36	-	-	-	-
CL2_25t_0,5FV	34,39	0,42	1436,79	12,09	24,66	0,82	1692,44	7,06	-	-	-	-
CL2_50t	29,69	0,25	1578,88	6,11	-	-	-	-	23,83	0,25	1813,65	5,99

A evolução da P_{ab} com a idade de todas as argamassas está representada na figura 5.20; por seu lado, a figura 5.21 regista a evolução dos valores de MV.

Globalmente verifica-se que as argamassas apresentam um decréscimo do valor de P_{ab} . É de destacar que as argamassas com fibras (CL2_25t_0.5 FV e CL2_25t_1FV) são as que apresentam os valores mais elevados de P_{ab} , comparativamente à argamassa mista com a incorporação da mesma percentagem de terra 25% e à argamassa de cal aérea, CL2.

Tendencialmente, com a evolução da idade, constata-se uma diminuição da porosidade aberta.

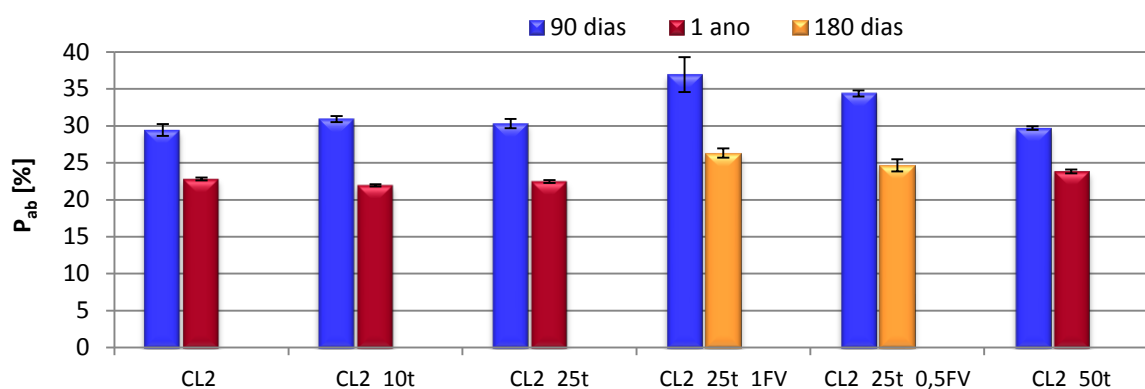


Figura 5.20 - Porosidade aberta de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias/ 1ano.

A análise da figura 5.21 permite observar que, no caso da MV, os valores têm uma evolução crescente com a idade. Um aspecto também a registar consiste no facto de, aos 90 dias, as argamassas

apresentarem valores semelhantes, sendo os mais elevados correspondentes aos da argamassa de referência (CL2), seguindo-se a argamassa mista com 50% e com 25% de terra.

Após 1 ano de idade verifica-se que não existe uma grande oscilação dos valores de massa volúmica. De acordo com o quadro 5.8, a introdução de terra produz uma diminuição da massa volúmica. Os valores mais baixos de MV estão associados às argamassas com incorporação de fibras.

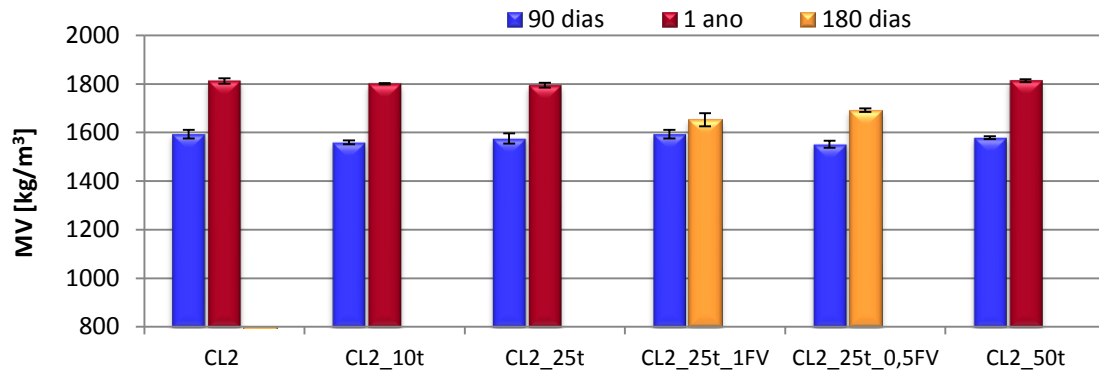


Figura 5.21 – Massa volúmica de todas as argamassas aos 90 dias e 180 dias / 1 ano.

Nas figuras 5.22 e 5.23 apresentam-se os valores de porosidade aberta e de massa volúmica para cada argamassa. Da análise dessas figuras verifica-se que, como expectável, a porosidade aberta é inversamente proporcional à massa volúmica; quando uma cresce a outra decresce.

Tendo como referência a argamassa de cal aérea sem incorporação de terra, verifica-se que, aos 90 dias, a introdução de terra faz aumentar o volume de poros no interior da argamassa (principalmente a argamassa com 10% de terra); para quantidades superiores a porosidade aberta diminui ligeiramente; no entanto, nunca é inferior à Pab da argamassa de referência. Como anteriormente referido, a introdução de fibras conduz a grandes incrementos da Pab. Naturalmente, a porosidade é uma característica fulcral das argamassas de edifícios antigos, principalmente no que ao controlo da humidade interior diz respeito. A tendência de evolução da massa volúmica com a idade mantém-se em todas as argamassas.

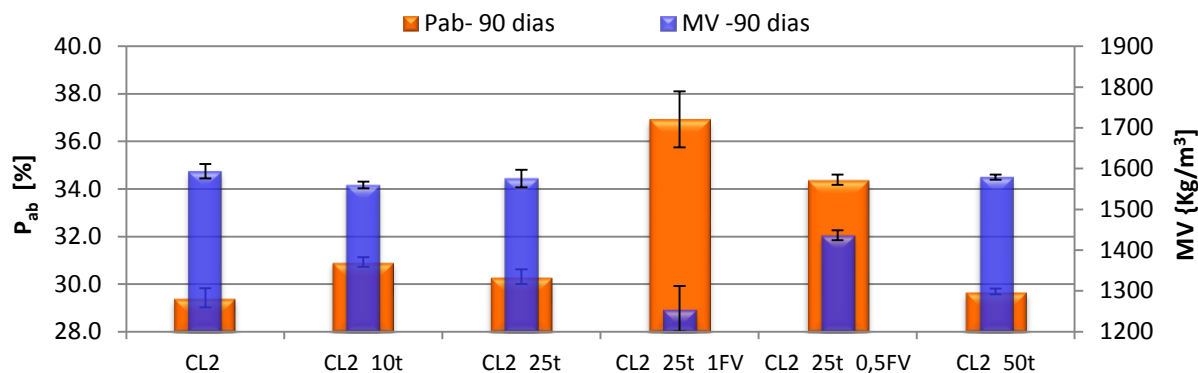


Figura 5.22 - Porosidade aberta e massa volúmica nos provetes prismáticos com 90 dias.

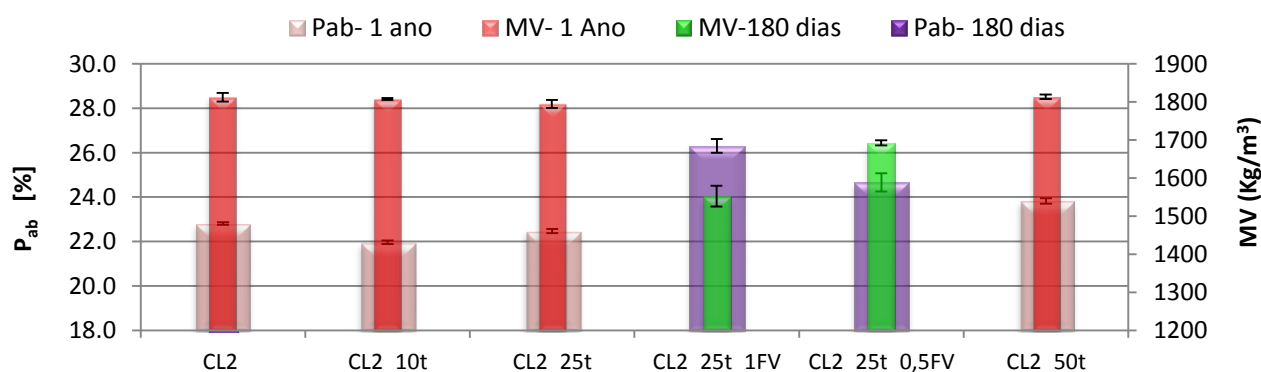


Figura 5.23 - Porosidade aberta e massa volúmica nos provetes prismáticos com 180 dias/ 1 ano.

5.2.1.9 Resistência aos sulfatos

As figuras que se apresentam nesta secção mostram a evolução da perda de massa das argamassas ao longo do ensaio de resistência aos sulfatos, a duas idades distintas: 90 dias e 180 dias/1 ano.

De acordo com a figura 5.24, na qual se observa a evolução aos 90 dias da resistência aos sulfatos, a argamassa com 50% de terra é a que oferece menor resistência, com perdas de massa significativas no final do ensaio (20º ciclo); no entanto, não se verificou a destruição total do provete com a conclusão do ensaio. Inicialmente, a argamassa com 25% de terra e a argamassa de referência apresentam aproximadamente o mesmo comportamento; no entanto, a argamassa com 25% de terra mostra, no final do ensaio, uma perda de massa ligeiramente superior quando comparada com a argamassa de referência. Destaca-se ainda a argamassa com 10% de terra que, em comparação com a argamassa de referência e com as restantes argamassas com terra, apresentou o maior valor de resistência aos sulfatos. Relativamente às argamassas com 25% de terra e com fibras, é notória a sua grande resistência aos sulfatos. De acordo com os valores obtidos, quanto maior for a percentagem de fibras, menor serão as perdas de massa ocorridas. É possível verificar que, no final do ensaio, a

argamassa com 25% de terra e com a incorporação da dosagem máxima de fibras vegetais regista perdas de massa inferiores a um terço da perda de massa da argamassa com a mesma percentagem de terra (25%) mas sem fibras.

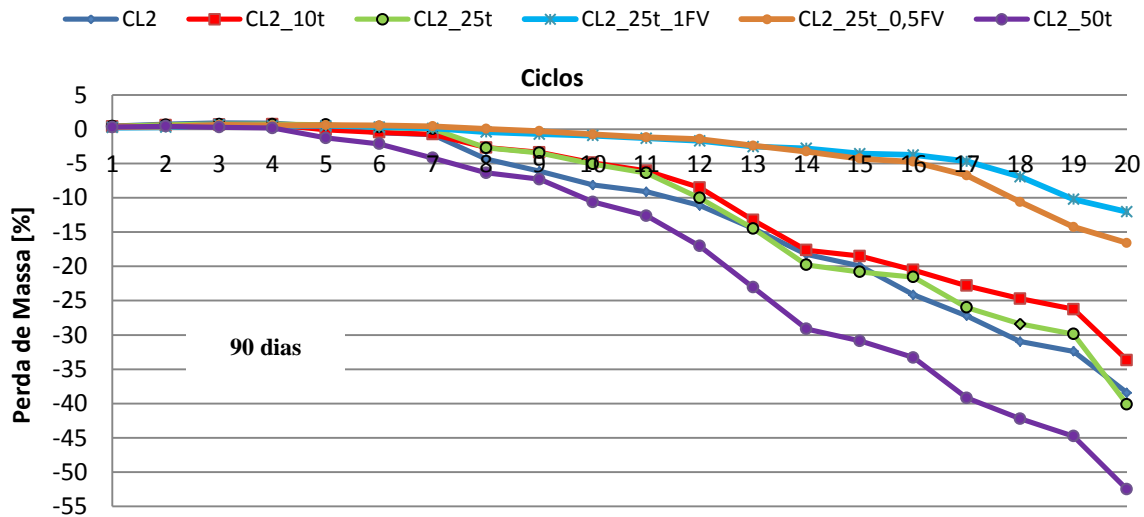


Figura 5.24 - Resistência aos sulfatos de todas as argamassas aos 90 dias.

A figura 5.25 permite acompanhar a evolução do ensaio dos sulfatos, após 180 dias/ 1 ano. Relativamente às argamassas com terra, à semelhança do que sucede aos 90 dias, a 1 ano de idade (figura 6.24), a argamassa com 50% de terra oferece menor resistência aos sulfatos, na medida em que apresenta maiores perdas de massa, no final do ensaio (20º ciclo). Porém, não se verificou a destruição total do provete com a realização deste ensaio. Em oposição ao sucedido aos 90 dias, a argamassa com 25% de terra apresenta um comportamento díspar da argamassa de referência, tendo o provete uma maior perda de massa.

A argamassa com 10% de terra ofereceu uma resistência inferior (dos 90 dias para 1 ano), tendo pior comportamento que a argamassa de referência. A perda de massa da argamassa de referência foi de cerca de 48%, enquanto a argamassa com 10% de terra obteve uma perda de massa na ordem dos 59%, no último ciclo do ensaio.

Aos 180 dias, a argamassa com 25% de terra e com a dosagem máxima de fibras mantém uma maior resistência aos sulfatos que a argamassa com igual composição mas com metade da dosagem máxima de fibras. No entanto, é possível verificar que, com a evolução da idade, a diferença da perda de massa entre as argamassas é superior. Aos 90 dias, CL2_25t_0.5FV perdeu mais 5% de massa do que a argamassa CL2_25t_1FV, enquanto aos 180 dias perdeu mais de 9%.

Face ao exposto, verifica-se que, globalmente, as argamassas têm uma menor resistência aos sulfatos, com a evolução da idade, uma vez que ocorrem maiores perdas de massa nos provetes para o mesmo ciclo do ensaio.

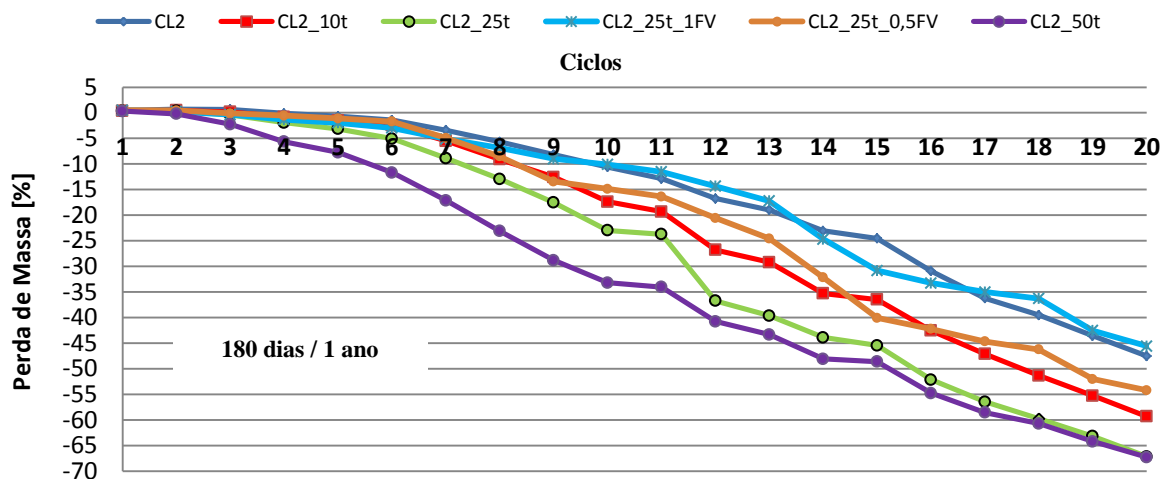


Figura 5.25 - Resistência aos sulfatos de todas as argamassas (aos 180 dias para as argamassas com fibras e a 1 ano para as restantes).

5.2.1.10 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A análise por porosimetria de mercúrio permite avaliar a estrutura porosa de cada argamassa ensaiada, ou seja, é possível conhecer não só a gama de poros existentes, mas também o volume total de poros. Neste ensaio, foi analisada apenas uma amostra do provete prismático de cada tipo de argamassa, devido ao custo e morosidade do ensaio. É possível traçar gráficos com a intrusão incremental de mercúrio em ordenadas e logarítmicas referentes ao diâmetro dos poros em abcissas. Não é de desprezar o erro associado a este ensaio, uma vez que existem poros de grandes dimensões que apenas são acessíveis por poros de menores dimensões. Deste modo, os resultados obtidos para os poros de maiores dimensões não correspondem totalmente à realidade da estrutura porosa da argamassa. “Considerando que a pressão necessária para a intrusão dos poros menores é superior à que seria exercida para os poros maiores, estes últimos serão representados como tendo uma dimensão equivalente à dos primeiros. É pois razoável assumir que os resultados da porosimetria de mercúrio apresentam valores de diâmetro de poros inferiores aos que na verdade existem” (Rato 2006). Na figura 5.26, está representada a distribuição dos diâmetros dos poros das argamassas dos provetes prismáticos em duas idades de cura (90 dias e 1 ano).

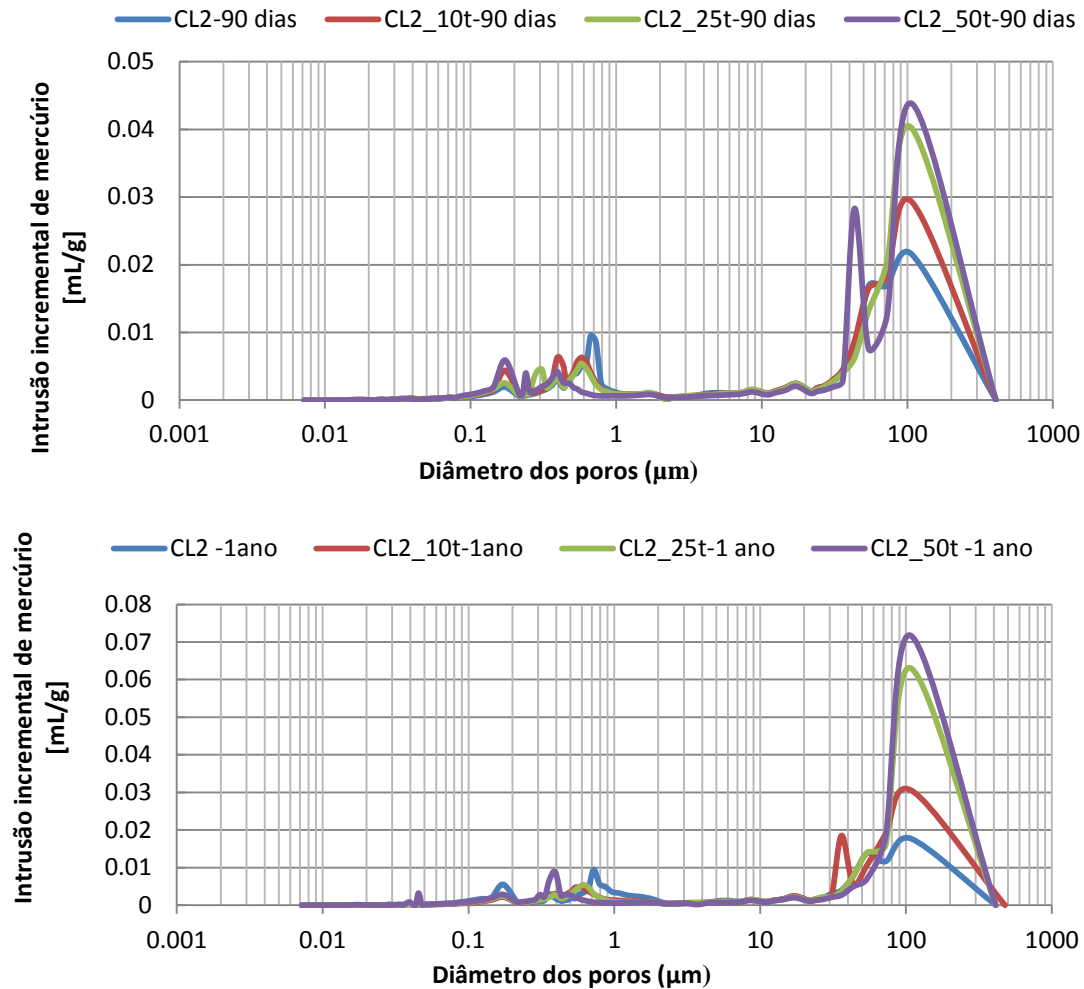


Figura 5.26 - Distribuição do tamanho de poros por intrusão de mercúrio (90 dias e 1 ano).

De acordo com a figura 5.26, aos 90 dias é possível verificar que, globalmente, as argamassas apresentam poros com dimensões semelhantes. As argamassas têm poros de menores dimensões entre os 0.18 e os 0.7 μm e os poros de maiores dimensões com cerca de 100 μm . Verifica-se que a maioria dos poros apresenta tamanho na ordem dos 100 μm . Destaca-se também que, de um modo geral, têm um considerável número de poros de pequeno diâmetro (0.17-0.7 μm)

Genericamente, verifica-se um aumento do número de poros com maiores dimensões nas argamassas com maior quantidade de terra. As argamassas com 10% e 50% de terra possuem um diâmetro elevado de poros, na ordem dos 36 μm e 55 μm , respectivamente. Em boa verdade, é possível que verdadeiramente existam poros com estas dimensões ou, como justificação alternativa, é possível que existam poros com dimensões superiores que são apenas acessíveis através destes poros com dimensões inferiores.

As argamassas com 25% e 50% de terra, após 1 ano de idade de cura, apresentam alterações na estrutura porosa, verificando-se um aumento significativo dos poros de maiores dimensões. A argamassa com 50% de terra e a argamassa de referência são as que possuem maior quantidade de poros com menor diâmetro (0.17-0.7 μ m). Globalmente, verifica-se uma diminuição da quantidade de poros com menor diâmetro dos 90 dias para 1 ano.

Na argamassa com 10% de terra, à semelhança do que acontece com argamassas aos 90 dias de cura, continuam a ser identificados poros com dimensões na ordem dos 35 μ m, sugerindo que, efectivamente, existem poros com essas dimensões. Resumidamente, com a evolução da idade, existe um aumento da quantidade de poros de maiores dimensões nas argamassas com maior quantidade de terra (25% e 50%). Verifica-se igualmente a diminuição da quantidade de poros com menor diâmetro.

O presente ensaio fornece também os valores da porosidade aberta. A evolução da porosidade aberta dos 90 dias para 1 ano de idade de cura encontra-se reflectida na figura 5.27. Destaca-se uma diminuição da porosidade aberta nas argamassas CL2_25t e CL2_50t. No entanto, a argamassa de referência e a argamassa com 10% de terra exibem um aumento da porosidade aberta.

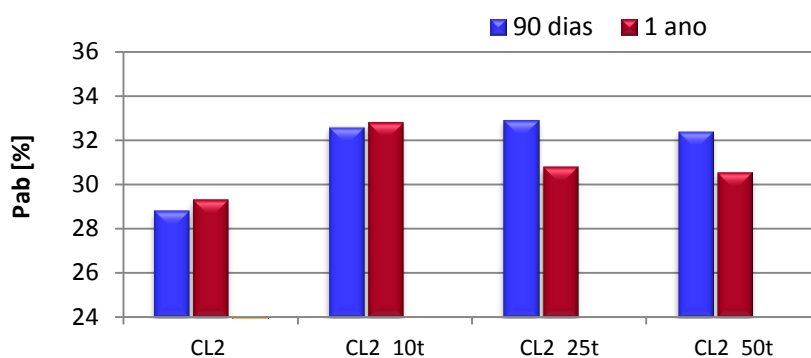


Figura 5.27 - Evolução da porosidade aberta (porosimetria de mercúrio) das argamassas dos provetes prismáticos.

5.2.1.11 Caracterização química e mineralógica

- *Análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX)*

A análise por DRX permite conhecer os compostos cristalinos existentes num determinado material. O resultado é expresso num difratograma com os picos característicos dos compostos presentes na amostra. Todas as amostras foram analisadas com duas idades distintas. As argamassas

com fibras foram analisadas aos 90 e 180 dias, enquanto as restantes aos 90 dias e 1 ano. No quadro 5.9 encontram-se os principais compostos identificados, bem como a notação utilizada nos difratogramas das amostras.

Quadro 5.9 – Compostos cristalinos identificados e notação utilizada

Composto	Notação	Fórmula Química
Anatase	A	TiO_2
Calcite	C	CaCO_3
Caulinite	k	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Feldspatos	F	$(\text{K},\text{Na},\text{Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_3$
Goetite	Go	$\text{FeO}(\text{OH})$
Mica	M	$\text{kAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Portlandite	P	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Quartzo	Q	SiO_2

Os compostos cristalinos identificados foram os seguintes:

- Calcite – Composto cristalino presente nas argamassas de cal e resultante da carbonatação da portlandite;
- Portlandite – Mineral da cal aérea, que é consumido na reacção de carbonatação;
- Quartzo – Mineral de sílica presente nos agregados e na terra;
- Feldspato- Mineral presente nos agregados e na terra;
- Caulinite – Mineral de argila maioritário presente na terra utilizada nas argamassas;
- Mica, Goetite e Anatase - Minerais minoritários presentes na terra incorporada nas argamassas.

À semelhança do que aconteceu na secção 3.4 - Materiais utilizados, apresentam-se os difratogramas da cal e da terra utilizada nas argamassas (figura 5.28). Pretende-se, assim, facilitar a compreensão dos compostos cristalinos identificados nas amostras.

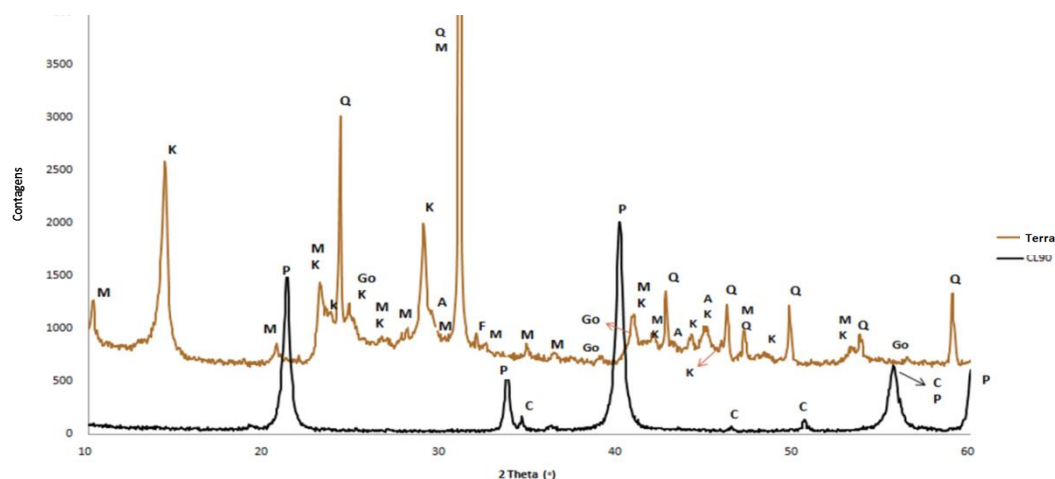


Figura 5.28 - Difratoograma da terra argilosa e da cal aérea. Notação: C - Caulinite; P - Portlandite; M - Mica; K - Caulinite; F - Feldspatos; A – Anatase; Go - Goetite

Da figura 5.29 à figura 5.34 são apresentados os difratogramas das várias argamassas estudadas. O objectivo é proceder à análise dos compostos cristalinos presentes e, em particular, avaliar a formação de novos compostos em resultado da reacção entre a cal e a terra, ou do consumo da cal com a evolução da idade (90 dias para 180 dias / 1 ano).

No quadro 5.10, encontra-se a composição mineralógica qualitativa de todas as argamassas.

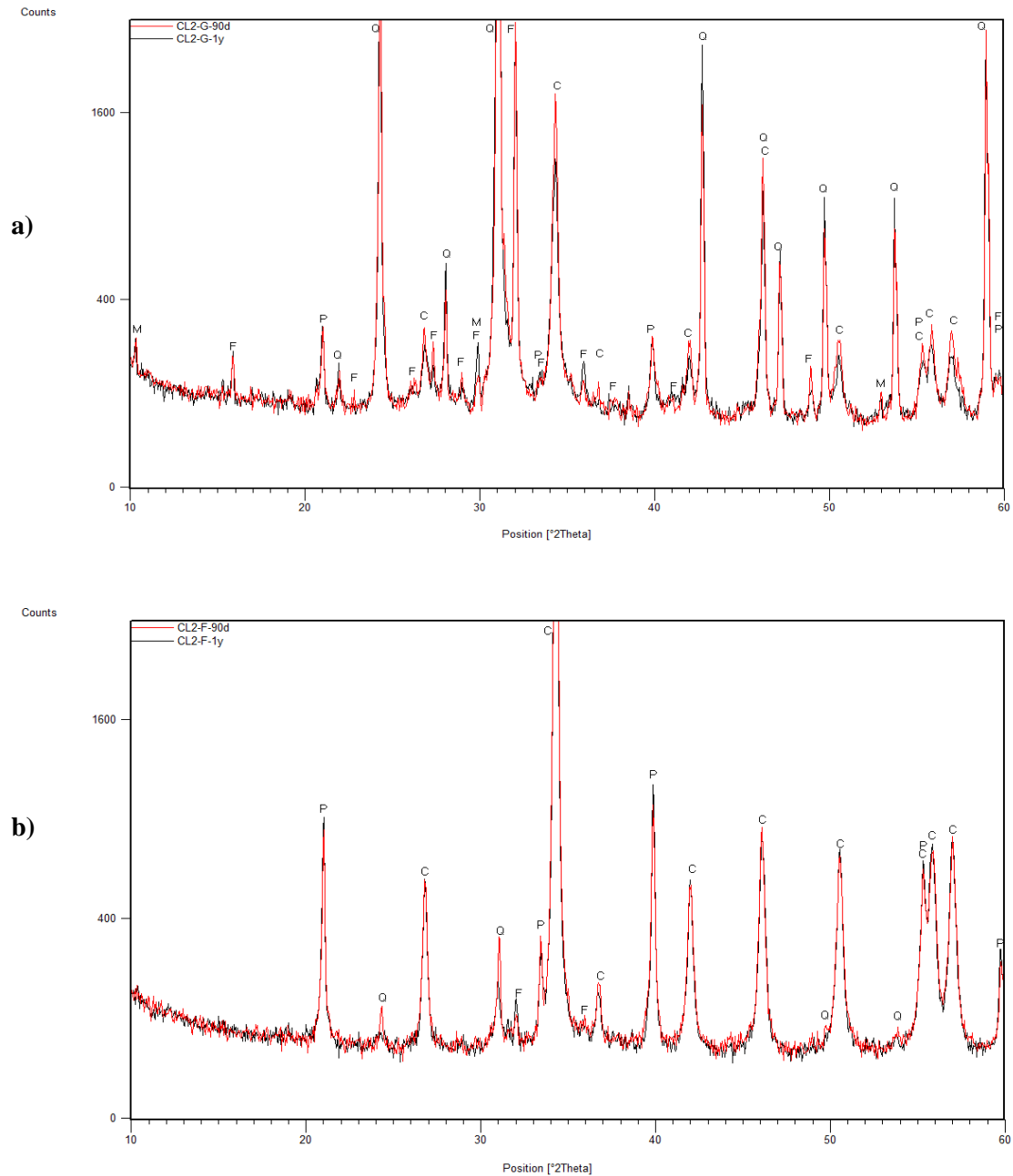


Figura 5.29 - Difratomogramas da argamassa de referência (CL2) aos 90 dias e 1 ano de idade: a) amostra global; b) fracção fina.

Notação: A – Anatase; C - Calcite; K - Caulinite; F – Feldspatos; Go – Goetite; M – Mica; P – Portlandite ; Q – Quartzo.

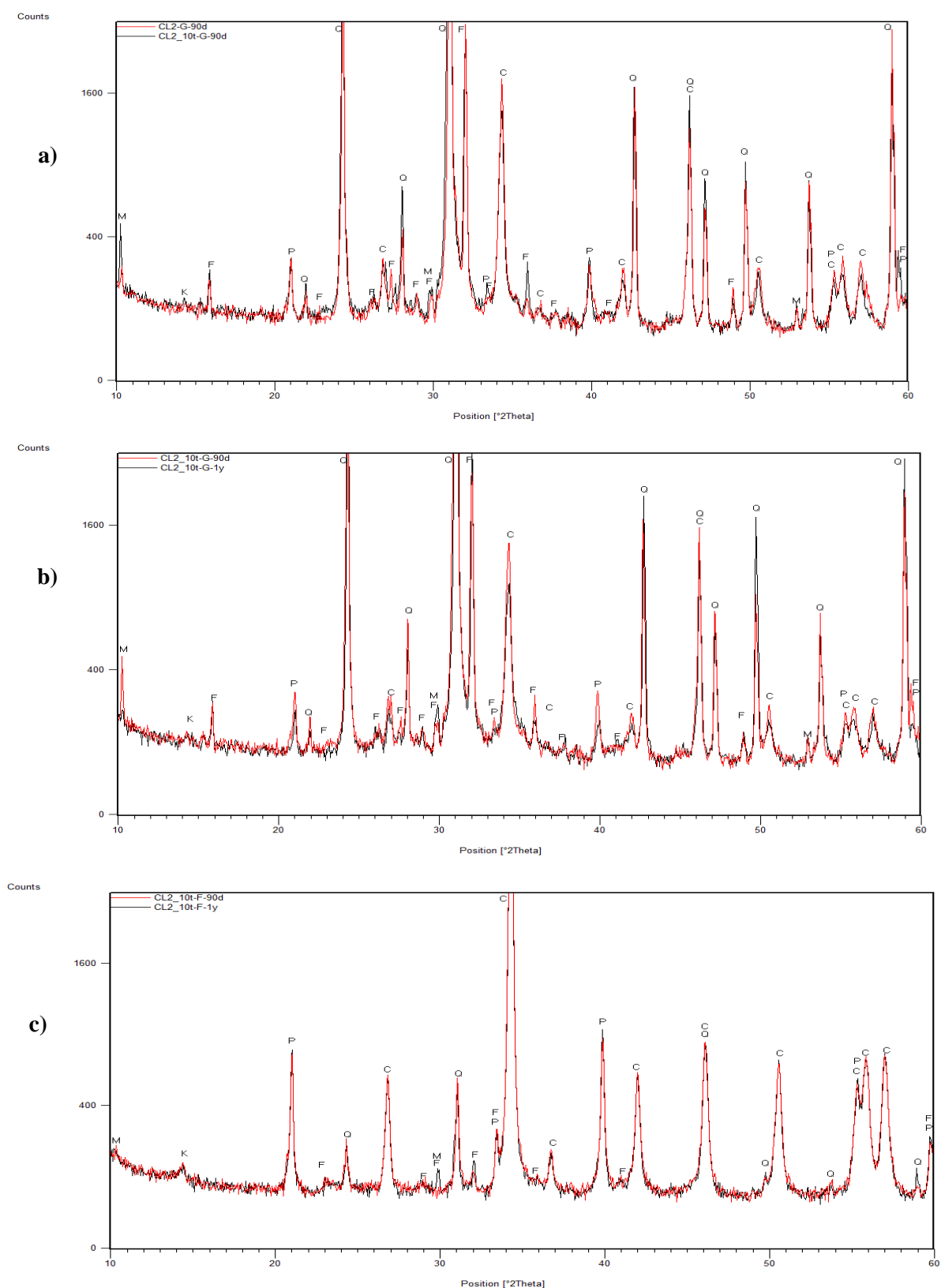


Figura 5.30 - Difractogramas das argamassas CL2 e CL2_10t : a) amostras globais das argamassas CL2 e CL2_10t à idade dos 90 dias; b) amostras globais da argamassa CL2_10t às idades de 90 dias e 1 ano; c) fracções finas da argamassa CL2_10t às idades de 90 dias e 1 ano.

Notação: A – Anatase; C - Calcite; K - Caulinite; F – Feldspatos; Go – Goetite; M – Mica; P – Portlandite ; Q – Quartz.

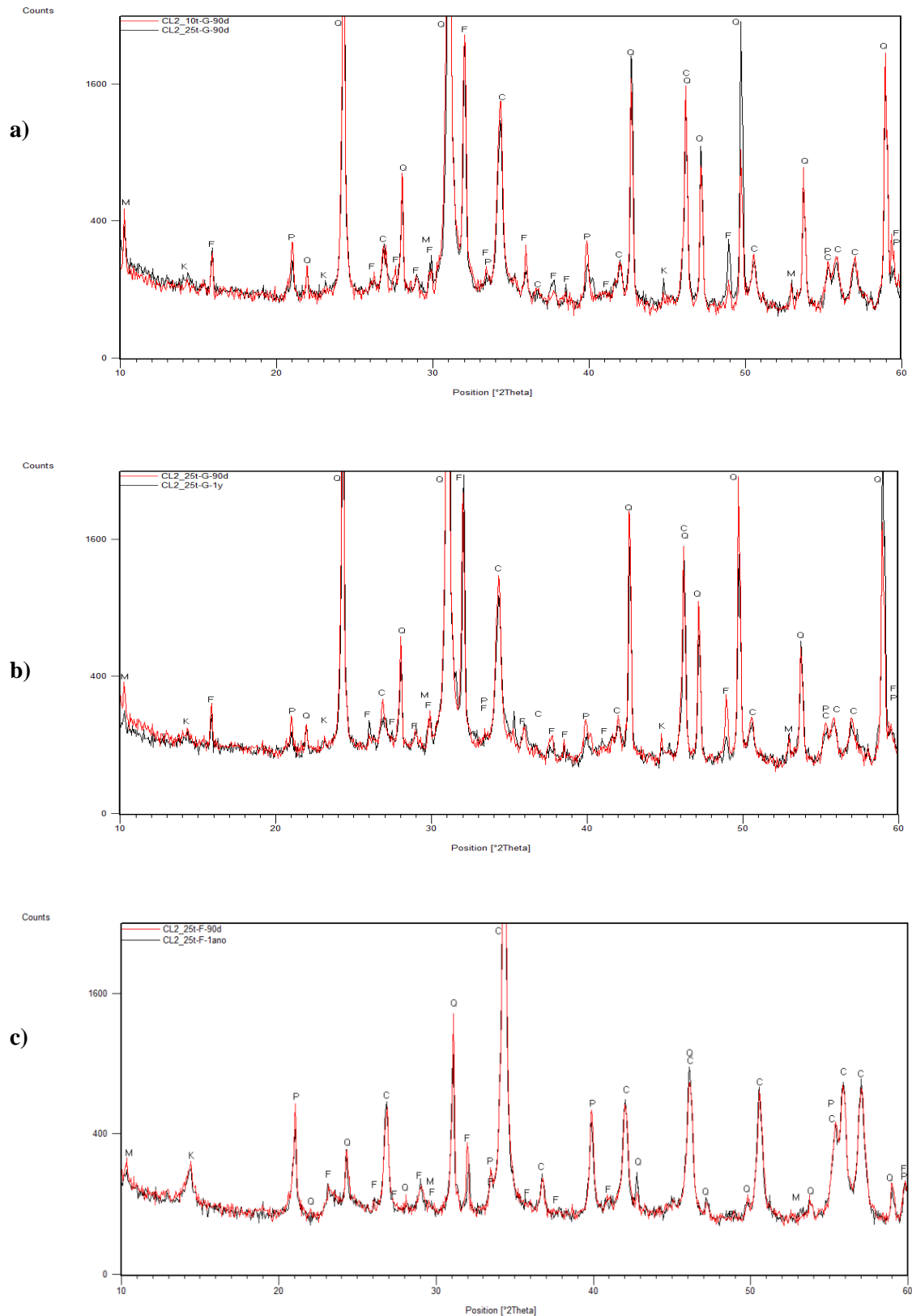


Figura 5.31 - Difratomogramas das argamassas CL2_10t e CL2_25t : a) amostras globais das argamassas CL2_10t e CL2_25t à idade dos 90 dias; b) amostras globais da argamassa CL2_25t às idades de 90 dias e 1 ano; c) frações finas da argamassa CL2_25t às idades de 90 dias e 1 ano.

Notação: A – Anatase; C – Calcite; K – Caulinite; F – Feldspatos; Go – Goetite; M – Mica; P – Portlandite ; Q – Quartz.

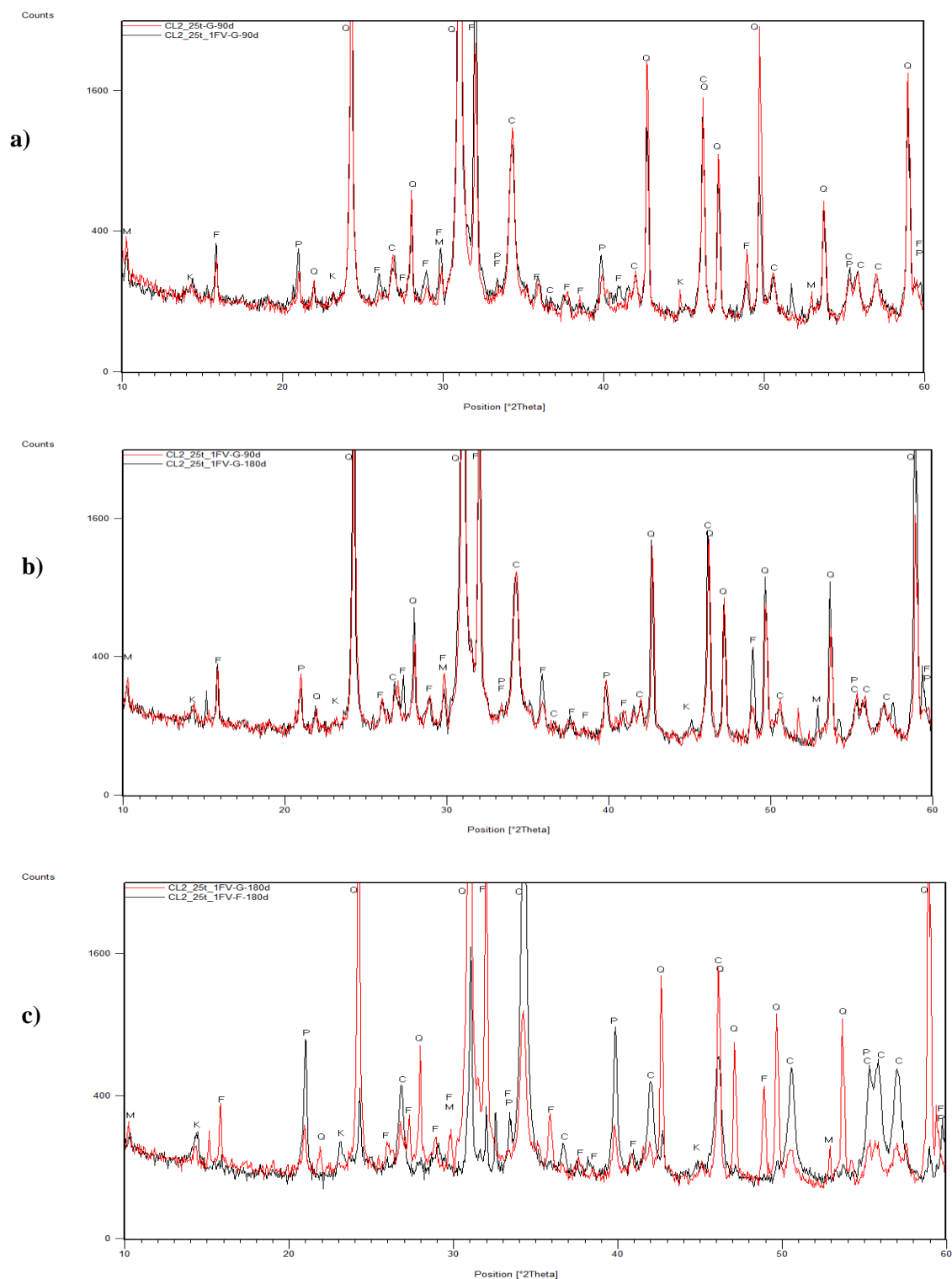


Figura 5.32 - Difratomogramas da argamassa CL2_25t com e sem adição de fibras vegetais (dosagem máxima) : a) amostra global da argamassa com 25% de terra com e sem adição de fibras; b) amostra global da argamassa com adição de fibras aos 90 e 180 dias de idade; c) Fracção fina e amostra global da argamassa com adição de fibras aos 180 dias.

Notação: A – Anatase; C - Calcite; K - Kaolinite; F – Feldspatos; Go – Goetite; M – Mica; P – Portlandite ; Q – Quartz.

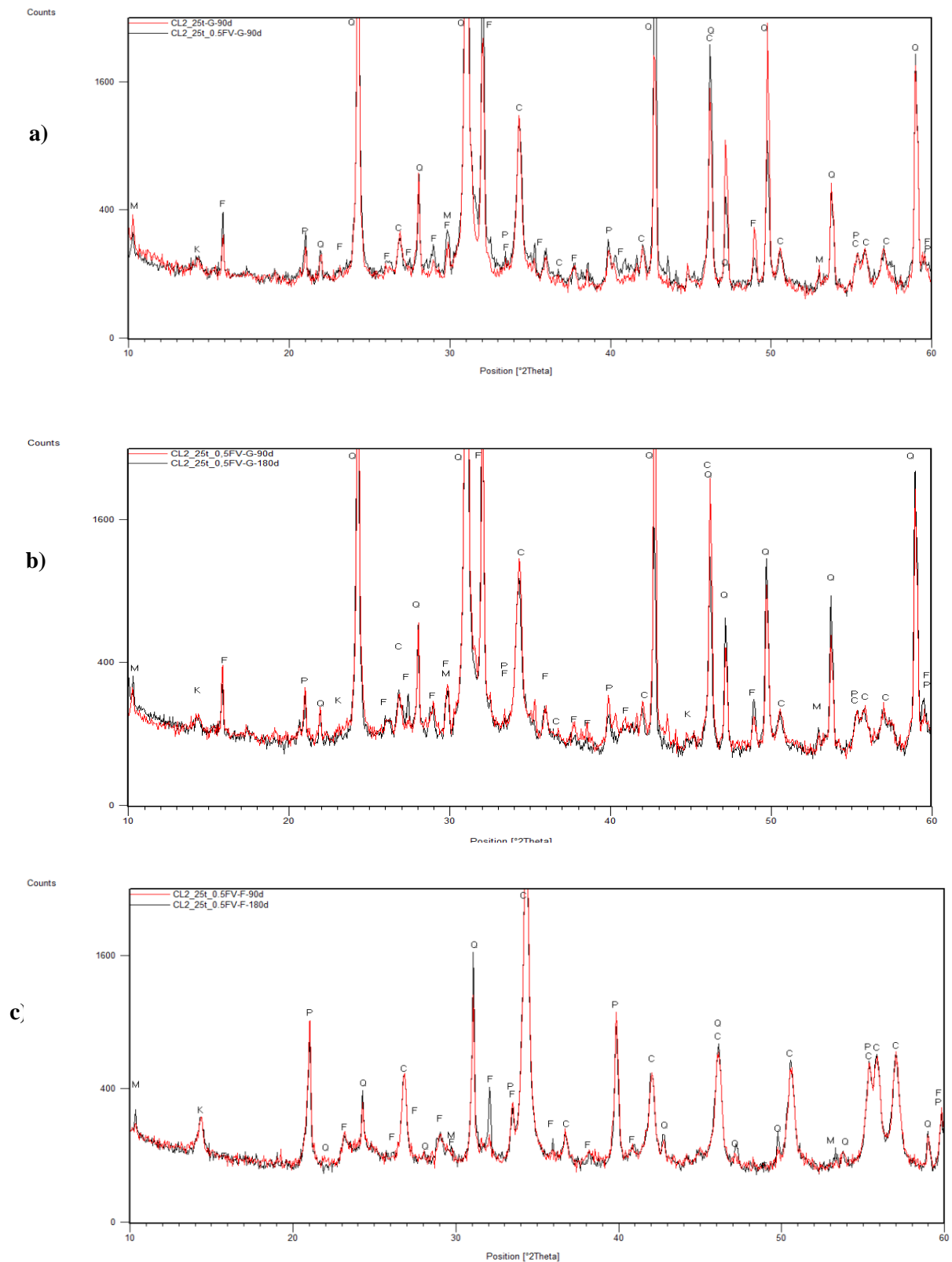


Figura 5.33 - Difratogramas das argamassas CL2_25t com (dosagem mínima) e sem fibras aos 90 dias e 180 dias : a) amostras globais aos 90 dias; b) amostras globais aos 90 e 180 dias da argamassa com fibras; c) frações finas aos 90 e 180 dias da argamassa com fibras.

Notação: A – Anatase; C – Calcite; K – Caulinite; F – Feldspatos; Go – Goetite; M – Mica; P – Portlandite ; Q – Quartzo.

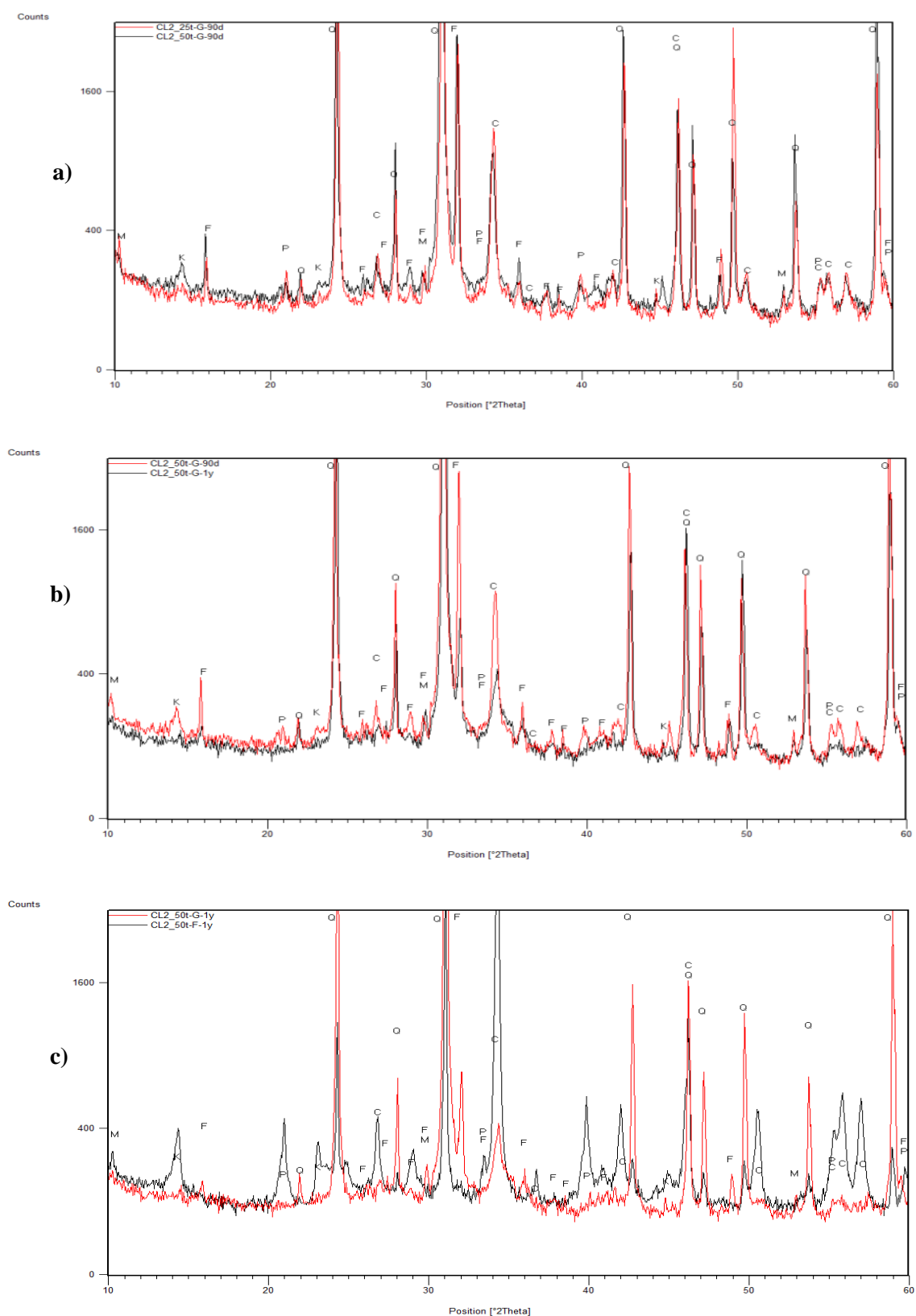


Figura 5.34 - Difratomogramas das argamassas CL2_25t e CL2_50t ; a) amostras globais das argamassas CL2_25t e CL2_50t aos 90 dias; b) amostras globais da argamassa CL2_50t aos 90 dias e 1 ano de idade; c) fracções finas da argamassa CL2_50t aos 90 dias e 1 ano de idade.

Notação: A – Anatase; C - Calcite; K - Caulinite; F – Feldspatos; Go – Goetite; M – Mica; P – Portlandite ; Q – Quartz.

Quadro 5.10 - Composição mineralógica qualitativa das argamassas a diferentes idades

Composto Cristalino	CL2				CL2_10t				CL2_25t			
	90 dias		1 ano		90 dias		1 ano		90 dias		1 ano	
	AG	FF	AG	FF	AG	FF	AG	FF	AG	FF	AG	FF
Quartzo	+++	+	+++	+	+++	+	+++	+	+++/++++	+	+++/++++	+
Feldspato	+ / ++	vtg	+ / ++	vtg	++	vtg	++	vtg	++	vtg / +	++	+
Mica	vtg	-	Vtg	-	vtg / +	? / vtg	vtg	? / vtg	vtg / +	vtg	vtg	vtg
Caulinite	-	-	-	-	? / vtg	vtg	? / vtg	vtg	vtg	+	vtg	vtg / +
Portlandite	+	++	+	++	+	++	vtg / +	++	vtg / +	++	vtg	+ / ++
Calcite	+++ / +++	+++	++	+++	++	+++	+ / ++	+++	+ / ++	+++	+ / ++ ⁽¹⁾	+++

Composto Cristalino	CL2_25t_1FV				CL2_25t_0,5FV				CL2_50t			
	90 dias		180 dias		90 dias		180 dias		90 dias		1 ano	
	AG	FF	AG	FF	AG	FF	AG	FF	AG	FF	AG	FF
Quartzo	+++	+ / ++	+++	+ / ++	+++ / ++++	+ / ++	+++ / ++++ +	+ / ++	+++ / ++++	++	+++ / ++ ++	+ / ++
Feldspatos	++ / +++	+	++ / +++ +	+	++ / +++	+	++ / +++	+	++ / +++	+	+ / ++	vtg / +
Mica	vtg / +	vtg / +	vtg / +	vtg	vtg / +	vtg	vtg / +	vtg	vtg	vtg / +	?	vtg
Caulinite	vtg	vtg / +	vtg	vtg / +	vtg	+	vtg	+	vtg / +	+ / ++	? / vtg	+ / ++
Portlandite	+	++	+	++	+	++	+	++	vtg	+ / ++	-	+ / ++
Calcite	+ / ++	+++ / ++ +++	+ / ++	+++ / ++ +++	++	+++ / +++ +	++	+++ / ++++	+ / ++	++ / +++	+	+++ / ++ +

Notação: ++++ → composto predominante (> 90%); +++ → existe em grande quantidade (40%-89%); ++ → existe em média quantidade (20%-39%); + → existe em fraca quantidade (5%-12%); vtg → vestígios (< 5%); ? → dúvidas na presença; - → composto não detectado.

De acordo com os resultados da DRX (quadro 5.10) verifica-se que à idade dos 90 dias os compostos cristalinos presentes em maior quantidade na argamassa de referência são o quartzo e a calcite, o primeiro do agregado e o segundo decorrente da carbonatação da cal.

Na argamassa de referência não se verificou o aparecimento de novos compostos, embora o teor de calcite tenha diminuído ligeiramente com o aumento da idade, provavelmente devido a perda de pasta durante o manuseamento dos provetes. A reacção de carbonatação parece estar esgotada aos 90 dias de idade, uma vez que o teor de portlandite manteve-se inalterado a partir dessa idade. Esta situação poderá estar relacionada com a dificuldade de se distinguir por DRX pequenas diferenças nos teores dos compostos cristalinos presentes, ou a uma menor difusão do CO₂ na estrutura porosa da argamassa. De facto, a carbonação ocorre do exterior para o interior e, à medida que a reacção ocorre, a dimensão dos poros do ligante diminui. Cria-se, assim, uma barreira, ou seja, uma dificuldade acrescida para a difusão do CO₂, e isso levará à permanência de portlandite livre na argamassa. Este

tipo de reacções em argamassas de cal aérea, necessitam que a estrutura porosa da argamassa seja suficientemente aberta, pois só desse modo pode ocorrer a difusão do CO_2 e garantir que a água presente dissolva o dióxido de carbono (Papayianni e Stefanidou, 2006).

Em relação às argamassas com incorporação de terra, a DRX mostra, como seria de esperar, um aumento do pico da caulinite com o incremento da substituição de cal por terra e no sentido contrário a diminuição da portlandite. À semelhança da argamassa de referência não houve a formação de nenhum composto cristalino com o aumento da idade de cura, o que indicia que os minerais de argila na terra têm baixa reactividade com a cal. Este resultado já era esperado, atendendo à informação do estado do conhecimento (secção 2.4.2.2). A reacção pozolânica entre a cal e a argila desenvolve-se com a destruição das camadas de sílica e alumina da argila, formando-se silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. A caulinite possui uma reduzida capacidade de troca de cationes e, subsequentemente, as suas camadas estruturais não são facilmente abertas para reagirem com a cal (Bergaya et al., 2006).

É importante referir, e curiosamente ao contrário do esperado, que a quantidade de calcite e de portlandite diminui com o aumento da idade em todas as argamassas com terra. A diminuição da quantidade de portlandite poderá indicar a formação de compostos amorfos, que não são identificados pela análise de DRX. Para medir o consumo de cal e saber onde foi consumido é fundamental completar a informação obtida por DRX, com ensaios termogravimétricos ou medidas químicas que permitissem avaliar teores de iões em solução.

As argamassas com adição de fibras vegetais também evidenciaram que não houve formação de novos compostos cristalinos, resultado que já era esperado. Convém lembrar que as fibras adicionadas são de casca de arroz, e não a cinza da casca de arroz, que é reconhecidamente um material pozolânico devido ao seu alto teor em sílica amorfa. À semelhança do que aconteceu na argamassa com 25% de terra mas sem fibras, verificou-se a diminuição da quantidade de calcite e de portlandite, mas em menor quantidade do que nas restantes argamassas mistas (cal aérea e terra e sem fibras).

- Análise termogravimétrica e análise termogravimétrica diferencial (TG-DTG)

Na figura 5.35, apresentam-se as curvas TG e DTG das matérias-primas das argamassas: terra caulinítica e cal aérea.

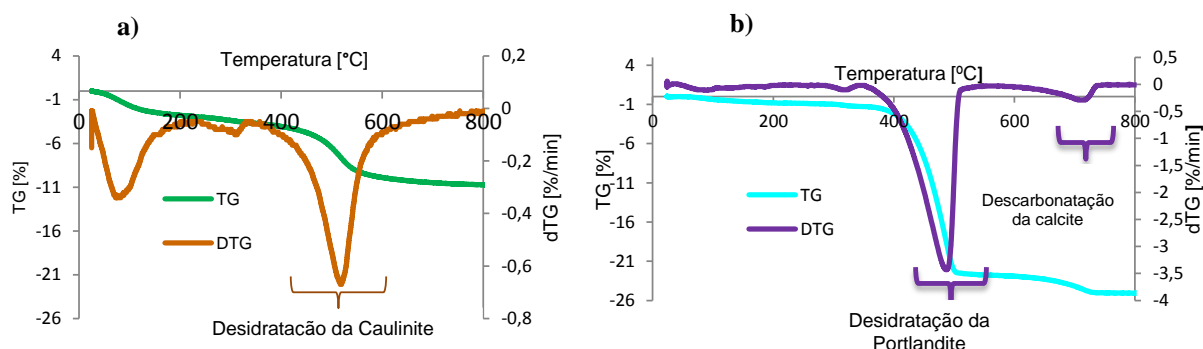


Figura 5.35 - Curvas TG e DTG dos ligantes usados nas argamassas: a) terra caulinítica; b) cal aérea hidratada.

Na figura 5.36, apresentam-se as curvas DTG de todas as argamassas às idades de 90 dias e 180 dias/ 1 ano. As curvas presentes exibem essencialmente duas gamas de temperatura onde ocorrem perdas de massa (pm) características de decomposição térmicas dos compostos hidratados e carbonatados presentes nas argamassas. Essas perdas de massa, de acordo com a composição mineralógica obtida por DRX, correspondem a:

- 350 °C- 550 °C – perda de massa devida à desidratação da portlandite da cal e desidratação da caulinite da terra.
- 550 °C- 850°C – perda de massa devida à descarbonatação da calcite resultante da carbonatação da cal.

No quadro 5.11 apresentam-se as perdas de massa nos intervalos das duas gamas de temperatura de todas as argamassas às idades de 90 dias e 180 dias /1 ano.

Quadro 5.11 - Perdas de massa analisadas.

Amostras	Perdas de massa [%]					
	350-550 °C			550-850°C		
	90 dias	180 dias	1 ano	90 dias	180 dias	1 ano
CL2	0,44	-	0,31	5,85	-	4,99
CL2_10t	0,52	-	0,16	4,52	-	4,03
CL2_25t	0,43	-	0,23	3,58	-	3,58
CL2_25t_1FV	0,77	0,50	-	4,23	3,64	-
CL2_25t_0,5FV	0,65	0,44	-	4,49	3,75	-
CL2_50t	0,60	-	0,48	2,54	-	1,83

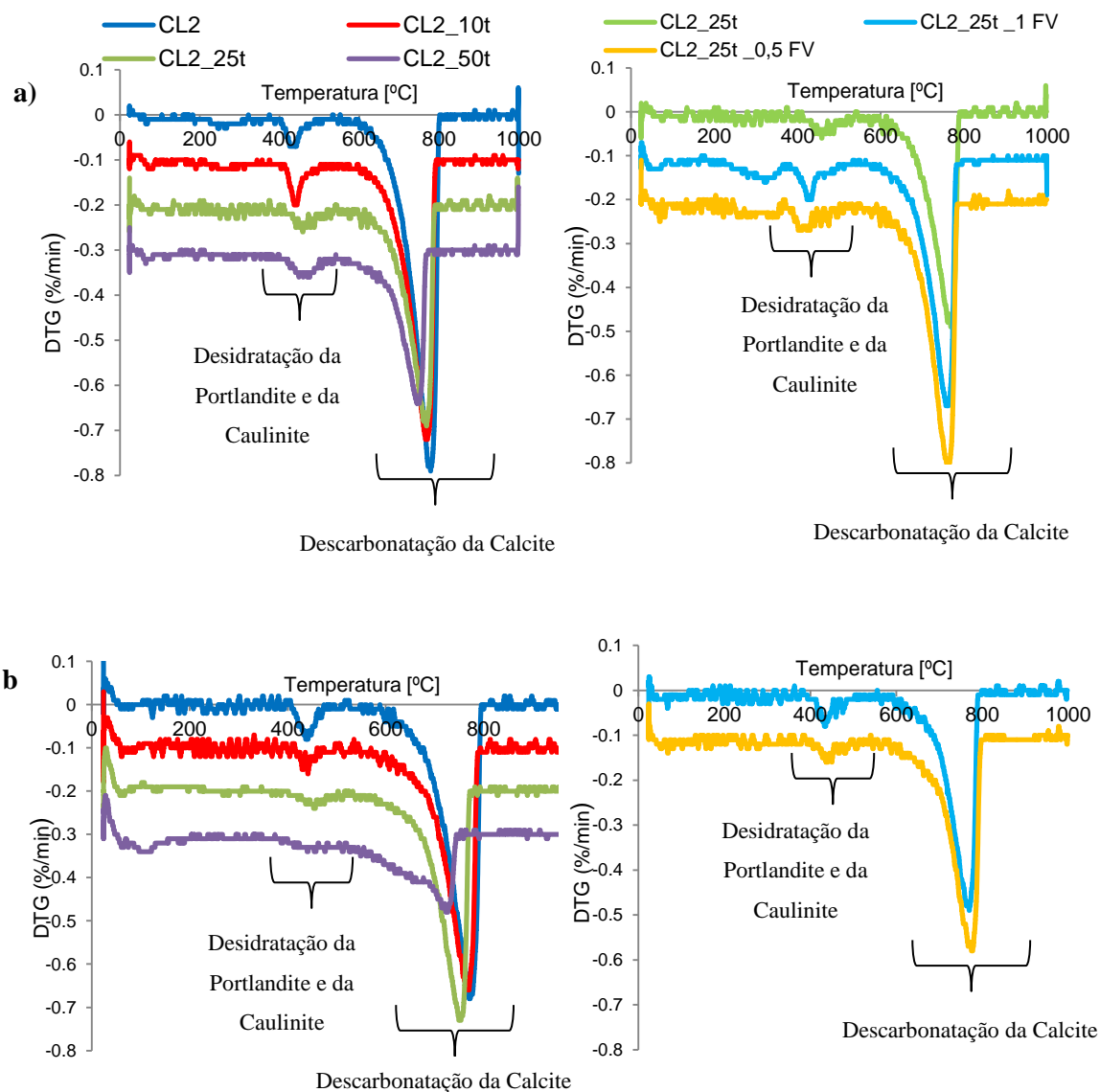
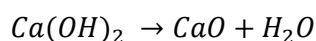


Figura 5.36 - Curvas de DTG de todas as argamassas: a) 90 dias ; b) 180 dias para as argamassas com fibras e 1 ano para as restantes.

Com base nos valores das perdas de massa (quadro 5.11), e nas correspondentes reacções químicas associadas, é possível calcular o teor de portlandite livre e consumida na reacção de carbonatação.

Nesta dissertação decidiu-se expor as expressões de cálculo destes teores, de forma mais detalhada, com vista à compreensão dos pressupostos tidos em conta.

Assim, no intervalo de temperatura 350-550°C, ocorre a perda de massa correspondente à reacção de desidratação da portlandite:



Com base no referido anteriormente, é necessário enfatizar que no mesmo intervalo de temperatura existe também a desidratação da caulinite.

Deste modo, o teor de portlandite livre, Ca(OH)_2 , na argamassa, é calculado de acordo com a seguinte equação (com base em Grilo et al., 2014):

$$\text{teor}_{\text{livre}}(\text{Ca(OH)}_2) = \text{pm}(\text{portlandite})_{350-550^\circ\text{C}} \times \frac{\text{MM Ca(OH)}_2}{\text{MM H}_2\text{O}}$$

onde $\text{pm}(\text{portlandite})_{350-550^\circ\text{C}}$ corresponde à perda de massa de H_2O no intervalo $350-550^\circ\text{C}$ e o quociente $(\text{MM Ca(OH)}_2/\text{MM H}_2\text{O})$ corresponde à relação molar entre os dois compostos (Ca(OH)_2 e H_2O).

Como anteriormente referido e no caso das argamassas com terra, no intervalo de temperaturas dos $350-550^\circ\text{C}$ dá-se também a desidroxilação da caulinite. Deste modo, à perda de massa total na gama de temperatura considerada, é necessário subtrair a contribuição da perda de massa da caulinite. Obtém-se, deste modo, a perda de massa, que resulta exclusivamente da desidratação da portlandite, de acordo com a equação:

$$\text{pm}(\text{portlandite})_{350-550^\circ\text{C}} = \text{pm total}_{350-550^\circ\text{C}} - \text{pm}(\text{terra caulinitica})_{350-550^\circ\text{C}}$$

A perda de massa associada à terra é determinada de acordo com a % de massa de terra introduzida na argamassa:

$$\text{pm}(\text{terra caulinitica})_{350-550^\circ\text{C}} = \frac{\% \text{ massa de terra na argamassa}}{100} \times \text{pm terra}_{350-550^\circ\text{C}}$$

onde,

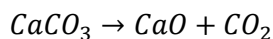
$$\% \text{ massa de terra na argamassa} = \frac{\text{massa de terra na argamassa}}{\text{massa total (todos os constituintes)}} \times 100$$

Quadro 5.12 – Perda de massa na terra

Matéria-Prima	pm (%)
	350-550
Terra Caulinitica	6,65

$$\text{pm terra}_{350-550^\circ\text{C}} = 6.65$$

De forma semelhante, a partir da perda de massa obtida no intervalo $550-850^\circ\text{C}$, e da razão molar entre calcite e dióxido de carbono libertado, é possível calcular o teor de CaCO_3 na argamassa:



$$teor (CaCO_3)_{total} = pm_{550-850^{\circ}C} \times \frac{MM CaCO_3}{MM CO_2}$$

onde $pm_{550-850^{\circ}C}$ corresponde à perda de massa de CO_2 no intervalo $550-850^{\circ}C$ e o quociente $(MM CaCO_3 / MM CO_2)$ corresponde à relação molar entre os dois compostos ($CaCO_3$ e CO_2).

É necessário ter, também, em conta que a matéria-prima, nomeadamente a cal, pode conter alguma calcite, pelo que é necessário corrigir o teor de $CaCO_3$ na argamassa:

$$teor (CaCO_3)_{corrigido_c} = teor de CaCO_{3total} - (teor de CaCO_{3cal} \times \frac{\% massa de cal utilizada na argamassa}{100})$$

onde,

$$teor (CaCO_3)_{cal} = pm_{cal_{550-850^{\circ}C}} \times \frac{MM CaCO_3}{MM CO_2}$$

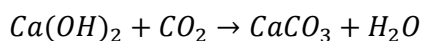
Quadro 5.13 – Perda de massa na cal

Matéria-Prima	pm (%)
	350-550
Cal	2.29

$$pm_{terra_{350-550^{\circ}C}} = 2.29$$

$$\% massa de cal na argamassa = \frac{massa de cal na argamassa}{massa total (todos os cosntituintes)} \times 100$$

Com a reacção de carbonatação do $Ca(OH)_2$:



e o teor de calcite, é possível calcular o teor total de portlandite que carbonatou, ou seja, o teor de $Ca(OH)_2$ consumido na reacção de carbonatação:

$$teor de Ca(OH)_2_{carbonatado} = teor de CaCO_3_{Corrigido} \times \frac{MM Ca(OH)_2}{MM CaCO_3}$$

Depois dos cálculos anteriormente efectuados, pode-se determinar o teor de portlandite total na argamassa através da equação:

$$\text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ total na argamassa} = \text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ Carbonatado} + \text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ livre}$$

✓ **Exemplo de cálculo para a argamassa CL2, argamassa de referência aos 90 dias de idade**

1. Cálculo do teor de portlandite livre na argamassa:

$$\text{teor}_{\text{livre}}(Ca(OH)_2) = pm(\text{portlandite})_{350-550^\circ\text{C}} \times \frac{MM\ Ca(OH)_2}{MM\ H_2O}$$

onde,

MM = massa molar do elemento ou do composto

$$MM\ Ca\ (OH)_2 = MM\ Ca + 2 * MM\ O + 2 * MM\ H = 40 + 2 * 16 + 2 * 1 = 74\text{g/mol}$$

Dados:

Argamassa	pm (%)	
	350-550 °C	550-850 °C
CL2	0.44	5.85

$$pm(\text{portlandite})_{350-550^\circ\text{C}} = pm\ total_{350-550^\circ\text{C}} = 0.44$$

$$\text{teor}_{\text{livre}}(Ca(OH)_2) = pm(\text{portlandite})_{350-550^\circ\text{C}} \times \frac{MM\ Ca(OH)_2}{MM\ H_2O} = 0.44 * \frac{74}{18} = 1.8$$

2. Cálculo do teor de calcite:

$$\text{teor}(CaCO_3)_{\text{total}} = pm_{550-850^\circ\text{C}} \times \frac{MM\ CaCO_3}{MM\ CO_2} = 5.85 \times \frac{100}{44} = 13.3$$

onde,

$$MM\ CaCO_3 = MM\ Ca + 3 * MM\ O + MM\ C = 40 + 3 * 16 + 12 = 100\text{ g/mol}$$

$$MM\ CO_2 = MM\ C + 2 * MM\ O = 12 + 2 * 16 = 44\text{g/mol}$$

- Correção do teor de $CaCO_3$ na argamassa (tendo em conta que a cal pode conter calcite)

$$\text{teor}(CaCO_3)_{\text{corrigido}_c} = \text{teor de } CaCO_3_{\text{total}} - \left(\text{teor de } CaCO_3_{\text{cal}} \times \frac{\% \text{ massa de cal utilizada na argamassa}}{100} \right) = 13.3 - \left(5.2 * \frac{11.4}{100} \right) = 12.7$$

$$\text{teor}(CaCO_3)_{\text{cal}} = pm\ cal_{550-850^\circ\text{C}} \times \frac{MM\ CaCO_3}{MM\ CO_2} = 2.29 * \frac{100}{44} = 5.2$$

Matéria-Prima	pm (%)
	350-550
Cal	2.29

$$pm_{terra\ 350-550^{\circ}C} = 2.29$$

$$\% \text{ massa de cal na argamassa} = \frac{\text{massa de cal na argamassa}}{\text{massa total (todos os cosntituintes)}} \times 100 = 11.4$$

3. Teor de $Ca(OH)_2$ consumido na reacção de carbonatação:

$$\text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ carbonatado} = \text{teor de } CaCO_3 \text{ Corrigido} \times \frac{MM\ Ca(OH)_2}{MM\ CaCO_3} = 12.7 * \frac{74}{100} = 9.4$$

4. Teor de $Ca(OH)_2$ total na argamassa:

$$\text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ total na argamassa} = \text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ Carbonatado} + \text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ livre} = 9.4 + 1.8 = 11.2$$

✓ Exemplo de cálculo para a argamassa CL2 10t, com 10% de terra em substituição da massa de cal aos 90 dias de idade

1. Cálculo do teor de portlandite livre na argamassa:

$$\text{teor}_{\text{livre}}(Ca(OH)_2) = pm(\text{portlandite})_{350-550^{\circ}C} \times \frac{MM\ Ca(OH)_2}{MM\ H_2O}$$

onde,

MM = massa molar do elemento ou do composto

$$MM\ Ca(OH)_2 = MM\ Ca + 2 * MM\ O + 2 * MM\ H = 40 + 2 * 16 + 2 * 1 = 74 \text{ g/mol}$$

$$MM\ H_2O = MM\ O + 2 * MM\ H = 16 + 2 * 1 = 18 \text{ g/mol}$$

Dados:

Argamassa	pm (%)	
	350-550 °C	550-850 °C
CL2_10t	0.52	4.52

$$pm(\text{portlandite})_{350-550^{\circ}C} = pm_{total}_{350-550^{\circ}C} - pm(\text{terra caulinítica})_{350-550^{\circ}C}$$

$$pm \text{ (terra caulinítica)}_{350-550^{\circ}\text{C}} = \frac{\% \text{ massa de terra na argamassa}}{100} \times pm \text{ terra}_{350-550^{\circ}\text{C}}$$

$$\% \text{ massa de terra na argamassa} = \frac{\text{massa de terra na argamassa}}{\text{massa total (todos os cosntituintes)}} \times 100$$

Dados:

Matéria-Prima	pm (%)	CL2_10t	Matéria-prima	massa (g)	% massa
	350-550				
Terra Caulinitica	6,65		areia	4481,2	88,6
			cal aérea	521,28	10,3
			Terra	57,92	1,1
			Total	5060,4	100,0

$$pm \text{ terra}_{350-550^{\circ}\text{C}} = 6.65$$

$$\begin{aligned} \% \text{ massa de terra na argamassa} &= \frac{\text{massa de terra na argamassa}}{\text{massa total (todos os cosntituintes)}} \times 100 \\ &= \frac{57.92}{5060.4} * 100 = 1.1 \end{aligned}$$

$$pm \text{ (terra caulinítica)}_{350-550^{\circ}\text{C}} = \frac{\% \text{ massa de terra na argamassa}}{100} \times pm \text{ terra}_{350-550^{\circ}\text{C}} = \frac{1.1}{100} * 6.65 = 0.076$$

$$pm \text{ (portlandite)}_{350-550^{\circ}\text{C}} =$$

$$pm \text{ total}_{350-550^{\circ}\text{C}} - pm \text{ (terra caulinítica)}_{350-550^{\circ}\text{C}} = 0.52 - 0.076 = 0.444$$

$$teor_{livre} (Ca(OH)_2) = pm \text{ (portlandite)}_{350-550^{\circ}\text{C}} \times \frac{MM \text{ Ca(OH)}_2}{MM \text{ H}_2\text{O}} = 0.44 * \frac{74}{18} = 1.8$$

2. Cálculo do teor de calcite:

$$teor (CaCO_3)_{total} = pm_{550-850^{\circ}\text{C}} \times \frac{MM \text{ CaCO}_3}{MM \text{ CO}_2} = 4.52 \times \frac{100}{44} = 10.3$$

onde,

$$MM \text{ CaCO}_3 = MM \text{ Ca} + 3 * MM \text{ O} + MM \text{ C} = 40 + 3 * 16 + 12 = 100 \text{ g/mol}$$

$$MM \text{ CO}_2 = MM \text{ C} + 2 * MM \text{ O} = 12 + 2 * 16 = 44 \text{ g/mol}$$

- Correção do teor de CaCO_3 na argamassa (tendo em conta que a cal pode conter calcite)

$$teor (CaCO_3)_{corrigido_c} = teor \text{ de } CaCO_{3total} - \left(teor \text{ de } CaCO_{3cal} \times \frac{\% \text{ massa de cal utilizada na argamassa}}{100} \right) = 10.3 - \left(5.2 * \frac{10.3}{100} \right) = 9.7$$

$$\text{teor } (CaCO_3)_{cal} = pm \text{ cal}_{550-850^\circ C} \times \frac{MM \text{ CaCO}_3}{MM \text{ CO}_2} = 2.29 * \frac{100}{44} = 5.2$$

Matéria-Prima	pm (%)
	350-550
Cal	2.29

$$pm \text{ terra}_{350-550^\circ C} = 2.29$$

$$\% \text{ massa de cal na argamassa} = \frac{\text{massa de cal na argamassa}}{\text{massa total (todos os constituintes)}} \times 100 = 10.3$$

3. Teor de $Ca(OH)_2$ consumido na reação de carbonatação:

$$\text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ carbonatado} = \text{teor de } CaCO_3 \text{ Corrigido} \times \frac{MM \text{ Ca(OH)}_2}{MM \text{ CaCO}_3} = 9.7 * \frac{74}{100} = 7.2$$

4. Teor de $Ca(OH)_2$ total na argamassa:

$$\text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ total na argamassa} =$$

$$\text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ Carbonatado} + \text{teor de } Ca(OH)_2 \text{ livre} = 7.2 + 1.8 = 9$$

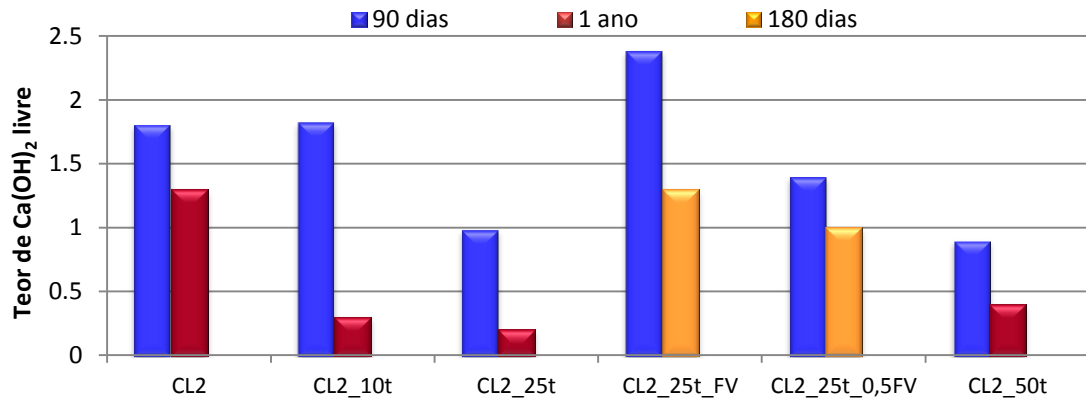
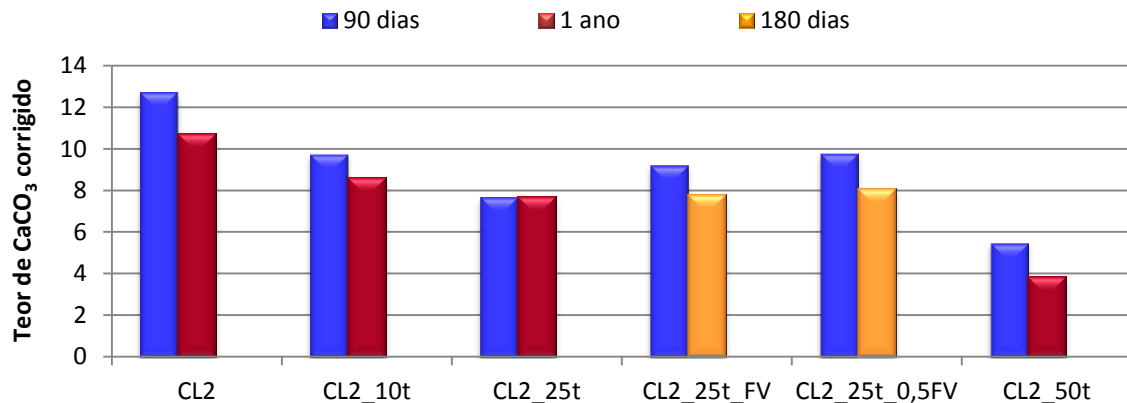
Com a realização deste ensaio e de acordo com os cálculos anteriormente apresentados, foi possível determinar o teor de portlandite livre (quadro 5.14) e o teor de calcite nas argamassas, neste último caso corrigido com o teor de carbonato existente na cal utilizada (quadro 5.15).

Quadro 5.14 - Teor de portlandite livre nas argamassas

	Teor de $Ca(OH)_2$ livre					
	CL2	CL2_10t	CL2_25t	CL2_25t_FV	CL2_25t_0,5FV	CL2_50t
90 dias	1,8	1,8	1,0	2,4	1,4	0,9
<u>180 dias/ 1ano</u>	1,30	0,30	0,20	<u>1,30</u>	<u>1,00</u>	0,40

Quadro 5.15- Teor de calcite nas argamassas

	Teor de CaCO_3 corrigido com o teor de carbonato na cal					
	CL2	CL2_10t	CL2_25t	CL2_25t_FV	CL2_25t_0,5FV	CL2_50t
90 dias	12,7	9,7	7,7	9,2	9,8	5,5
180 dias/1 ano	10,7	8,6	7,7	7,8	8,1	3,9

Figura 5.37 - Evolução do teor de Ca(OH)_2 livre nas argamassas.Figura 5.38 - Teor de CaCO_3 corrigido nas argamassas.

De acordo com as figuras 5.37 e 5.38 verifica-se que, genericamente, com a evolução da idade de cura a mesma argamassa apresenta uma diminuição do teor de portlandite livre, assim como uma diminuição do teor de calcite. Estes resultados que mostram não ter havido consumo de cal na reacção de carbonação, nem formação de compostos amorfos e cristalinos, revelam ter ocorrido perda de material da pasta. Este resultado inesperado, é também um incentivo para desenvolvimentos futuros, na tentativa de despistar esta perda de material fino. Este facto poderá estar associado ao frequente manuseamento dos provetes durante a cura (dos 90 dias para 1 ano), os quais mostraram ser um pouco friáveis, facto que poderá também explicar, em parte, a perda de material fino da superfície.

5.2.1 Provetes em tijolo

Como referido anteriormente, foram analisados provetes em tijolos aos 90 dias e 1 ano de idade para as argamassas sem fibras vegetais.

5.2.1.1 Dureza superficial por durómetro de Shore A

Os valores obtidos nestes ensaios encontram-se expostos na figura 5.39. Tais valores correspondem à média das várias medições realizadas.

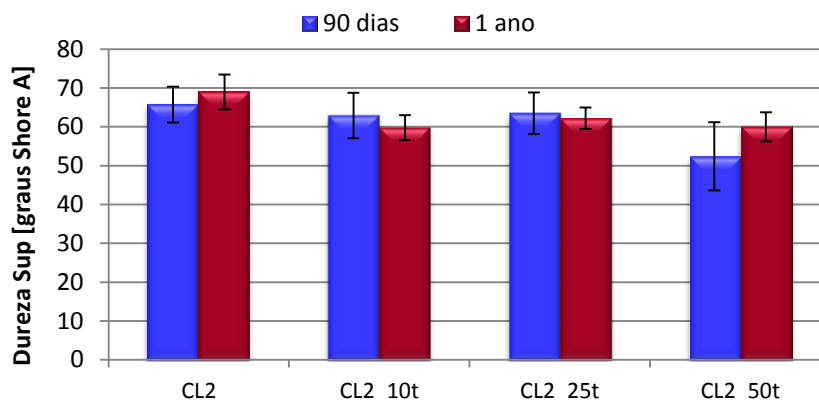


Figura 5.39 - Evolução da dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas em suporte de tijolo.

Neste ensaio avalia-se a dureza superficial da argamassa que foi aplicada sobre um tijolo, e é baseado na medida da resistência à penetração de um pino pressionado contra o material. O ensaio não apresenta grande precisão, uma vez que, se estiverem grãos de areia mais grossa à superfície a escala de medida pode ser ultrapassada. Com efeito, o durómetro de Shore A foi posicionado, tendo sido tomado o cuidado de escolher a superfície mais plana possível e em cada argamassa foram realizadas 10 leituras. Apesar do cuidado na realização do ensaio, verificou-se a grande sensibilidade relacionada com a irregularidade da superfície do reboco.

De acordo com os resultados da figura 5.39, pode-se concluir que a dureza superficial manteve-se praticamente constante até 1 ano de idade, não apresentando grandes oscilações, com exceção da argamassa com 50% de terra. Na argamassa com maior percentagem de terra, CL2_50t, existe uma grande diminuição da dureza superficial quando comparada com as restantes argamassas aos 90 dias de idade de cura. É de salientar também que foi esta amostra que apresentou nas medidas o maior desvio-padrão. Assim, os resultados são interpretados com alguma desconfiança.

Em suma, apesar de se saber que o durómetro de Shore A é mais apropriado para materiais mais deformáveis, considerou-se relevante expor os resultados obtidos de forma a expor as dificuldades encontradas.

5.2.1.2 Condutibilidade térmica

Na figura 5.40 apresentam-se os valores médios de condutibilidade térmica obtidos em 6 medições realizadas em cada argamassa e o respectivo desvio- padrão. O equipamento utilizado fornece directamente o valor da condutibilidade térmica (λ).

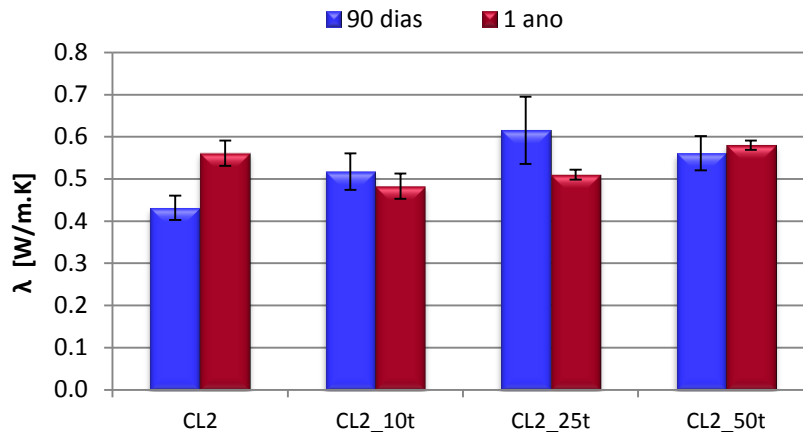


Figura 5.40 - Evolução da condutibilidade térmica nas argamassas aplicadas sobre tijolo.

De acordo com a figura 5.40, aos 90 dias de cura, a argamassa de referência, CL2, apresenta menor condutibilidade térmica, em oposição à argamassa com 25% de terra, CL2_25t, que apresenta o maior valor. Com a evolução da idade, a condutibilidade térmica das argamassas não apresenta a mesma tendência manifestada aos 90 dias, ou seja, a argamassa com menor condutibilidade térmica é a que têm 10% de terra, enquanto os maiores valores de λ correspondem à argamassa de referência, sem terra, e à argamassa com 50% de terra. Assim, pela observação da figura 5.40, não se notam tendências; porém com 1 ano de idade as argamassas com 10% e 25% de terra têm os valores mais baixos de λ , mostrando serem mais competitivas em relação à argamassa de cal aérea.

Tal como se referiu em 5.2.1.1, comparativamente com os valores de rebocos tradicionais, dos tabelados no ITE 50 do LNEC (Pina dos Santos & Matias, 2006) cujo valor de cálculo $\lambda = 0.8$ W/m.K para rebocos de cal e areia, verifica-se que todas as argamassas apresentam valores de condutibilidade térmica inferiores, mostrando assim terem boas características a nível térmico.

5.2.1.3 Velocidade de propagação de ultrassons

Na figura 5.41 mostra-se a evolução dos valores da velocidade de propagação de ultrassons com a idade de cura. A velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas resulta do quociente entre a distância entre um conjunto de pontos e o tempo médio de propagação de ondas entre eles. Com este

ensaio é também possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico da argamassa; no entanto, como é desconhecida a massa volúmica aparente do reboco, optou-se comparar as velocidades de propagação. É possível ainda avaliar, quer a compacidade do material, quer a homogeneidade, e detectar a existência de anomalias como, por exemplo, as fissuras e a perda de coesão das argamassas. Quanto menor for a compacidade, maior será o tempo do percurso entre transdutores, conduzindo a uma velocidade de propagação de ultrassons mais baixa.

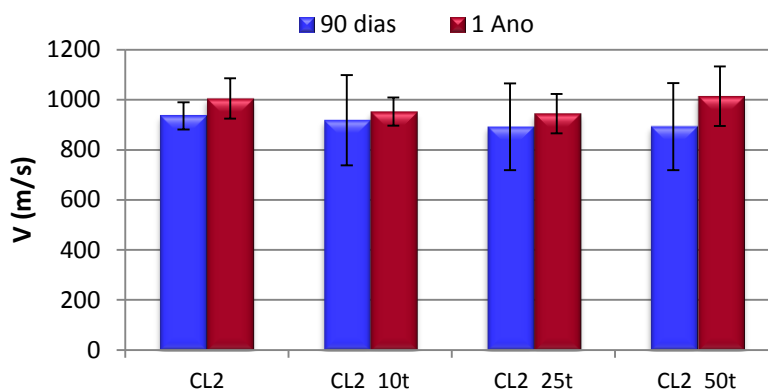


Figura 5.41 - Evolução da velocidade de propagação de ultrassons nas argamassas aplicadas sobre tijolo.

Todas as argamassas mostram um aumento da velocidade de propagação dos ultrassons dos 90 dias para 1 ano de idade de cura (figura 5.41). Este efeito pode ser interpretado como tendo o reboco uma maior compacidade. Para além disso, o aumento verificado pode também estar relacionado com um menor teor de humidade nos provetes. Aos 90 dias verifica-se que os valores da velocidade são aproximadamente constantes em todas as argamassas. Após 1 ano de idade de cura constata-se que a argamassa de referência e a com 50% de terra são as que apresentam os maiores valores, inclusive muito próximos entre si.

As argamassas CL2_10t e CL2_25t mostram ter valores semelhantes a 1 ano de idade. É de salientar ainda que, aos 90 dias, as medidas apresentam desvios-padrão muito grandes, o que poderá ser causado por anomalias como, por exemplo, microfissuras nas zonas onde a velocidade de propagação de ultrassons é inferior.

5.2.1.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten

A realização do presente ensaio permite avaliar a capacidade de absorção de água das argamassas, ou seja, a sua permeabilidade à água. Neste ensaio o volume de água absorvido é contabilizado durante um tempo pré-definido de 5, 10, 15 e 30 minutos. Apresentam-se na figura 5.42

os resultados obtidos aos 90 dias e 1 ano de idade de cura. Tendo em conta a sensibilidade do ensaio à colagem do tubo ao reboco, durante a realização do ensaio foi utilizada sempre a plasticina da mesma marca, que mostrava ser estanque.

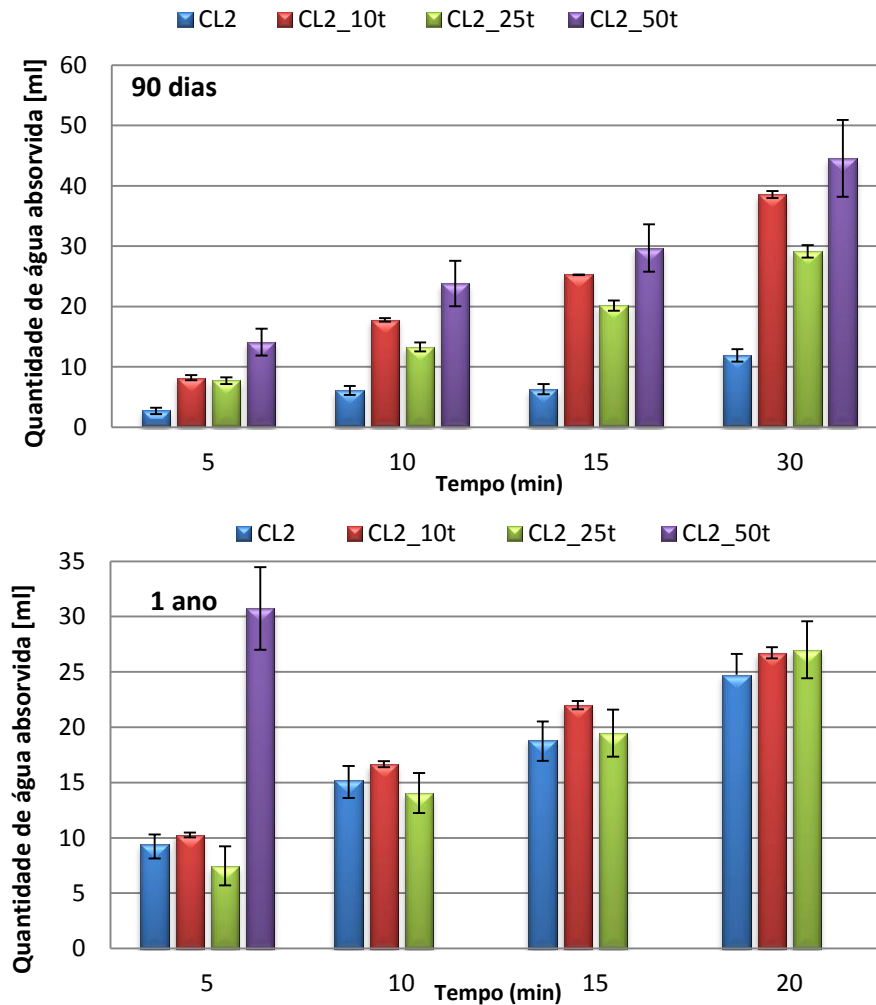


Figura 5.42 - Quantidade de água absorvida aos 90 dias e 1 ano de idade de cura das argamassas aplicadas sobre tijolo.

Relembra-se que o presente ensaio foi realizado com os tijolos colocados na posição vertical, tendo cada tubo sido ensaiado individualmente, o que permitiu controlar melhor o ensaio. Cada vez que a frente húmida atingia a interface de dois tubos de Karsten adjacentes, o ensaio terminava, passando a ser considerado no ensaio o tubo seguinte. Este procedimento, foi realizado nos provetes com 1 ano de idade, evitando que a zona da argamassa que irá ser ensaiada pelo tubo de Karsten seguinte esteja com os vazios preenchidos por água, falseando os resultados. Por outro lado, o procedimento permitiu que a duração total do ensaio fosse de 20 minutos, em vez de 30 minutos, à semelhança do sucedido aos 90 dias de idade (em que não houve esse cuidado).

Analisando globalmente a absorção de água aos 90 dias e 1 ano, é possível verificar que de entre todas as argamassas, a argamassa com 50% de terra (CL2_50t) é a que absorve maior quantidade

de água durante os 20 minutos da duração do ensaio. Aos 90 dias a argamassa de referência é a que absorve menos quantidade de água ao longo de todo o ensaio, seguindo-se a argamassa com 25% de terra. Genericamente, aos 90 dias, a argamassa com terra que apresenta o melhor comportamento é a argamassa com 25% de terra.

Após 1 ano de idade, verifica-se que a quantidade total de água absorvida diminui para a globalidade das argamassas, com excepção da argamassa com 50% de terra que, após 5 minutos, absorve maior quantidade de água do que as restantes argamassas aos 20 minutos de ensaio. No entanto, e ainda que durante a realização do ensaio não se verificasse qualquer tipo de escorrência no reboco, o valor bastante elevado da argamassa com 50% de terra poderá possivelmente ser justificado por uma má aderência da plasticina durante a sua aplicação no reboco. À semelhança do que aconteceu nas outras argamassas, na argamassa aplicada sobre o tijolo com 50% de terra, cada tubo de Karsten foi aplicado sobre o reboco individualmente, verificando-se sempre uma absorção muito rápida. Assim, não possível saber se o resultado apresentado é fidedigno, uma vez que este resultado pode estar também relacionado com fissuração não visível, que tenha permitido uma absorção tão rápida.

Observando os resultados após 1 ano de idade de cura, verifica-se que a argamassa com 25% de terra é de todas a que apresenta a menor quantidade de água absorvida, inclusive quando comparada com a argamassa de referência, CL2.

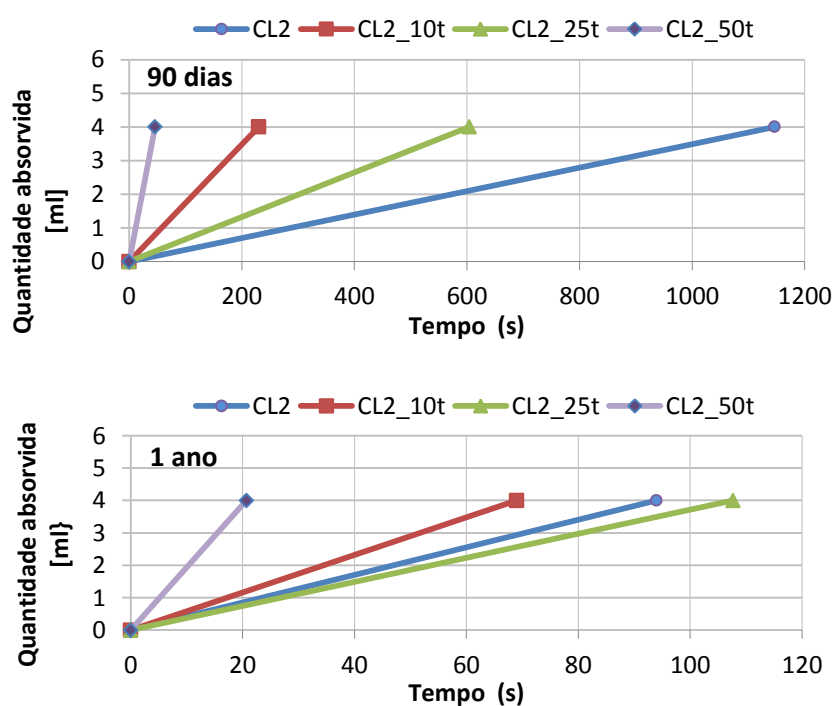


Figura 5.43 - Tempo necessário para absorver 4ml de água no reboco aplicado sobre o tijolo aos 90 dias e 1 ano de idade de cura.

De acordo com a figura 5.43, aos 90 dias, a absorção inicial de 4 ml de água é mais lenta na argamassa de referência e, em contraste, é mais rápida nas argamassas com 50% de terra. Nas restantes argamassas (10% e 25% de terra), o tempo de absorção é menor quanto maior for a percentagem de terra introduzida.

Após 1 ano de idade de cura há uma evidente evolução na absorção inicial de água, ou seja, todas as argamassas despendem menor tempo para absorver 4 ml de água. Neste caso, não é argamassa de referência que demora mais tempo a absorver a água inicialmente, mas sim a argamassa com 25% de terra, seguida de próximo da argamassa de referência. A argamassa com 50% de terra continua a ser a que absorve água mais rapidamente, demorando cerca de 20 segundos para absorver 4 ml de água. A argamassa que demonstrou um melhor comportamento foi a argamassa com 25% de terra, mostrando ser favorável se comparada com a argamassa de referência, que regista uma melhoria significativa dos 90 dias para 1 ano de idade de cura.

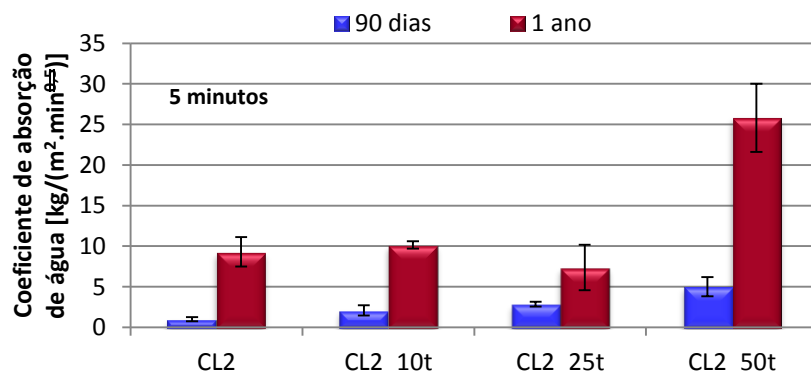


Figura 5.44 - Evolução dos coeficientes de absorção de água aos 5 minutos de ensaio nos provetes em tijolo.

Na figura 5.44 encontram-se os coeficientes de absorção de água, obtidos aos 5 minutos de ensaio com os tubos de Karsten para as diferentes argamassas. Este coeficiente reproduz o declive do segmento de recta entre o instante inicial de 0 minutos e os 5 minutos. Quanto maior o coeficiente, mais rápida é a absorção de água. Verifica-se que, com a evolução da idade, a absorção de água tornou-se mais rápida em todas as argamassas. Após 1 ano de idade de cura, a argamassa com 25% de terra tem o coeficiente mais baixo. O resultado a que se chegou era esperado, uma vez que, de acordo com a figura 5.44, esta argamassa apresenta a absorção mais lenta. A argamassa com 50% de terra apresenta os coeficientes de absorção de água maiores, tanto aos 90 dias como a 1 ano de idade de cura. Destaca-se também que o elevado valor do coeficiente de absorção aos 5 minutos da argamassa com 50% de terra era igualmente esperado porque, de acordo com a figura 5.44, esta argamassa tem uma absorção de água muito rápida.

5.2.1.5 Ensaio de absorção de água por capilaridade e secagem

- Absorção de água por capilaridade

Na figura 5.46 estão representadas as curvas de capilaridade das argamassas aplicadas sobre o suporte de tijolo com 1 ano de idade de cura. Este ensaio foi pioneiro no DEC da FCT/ UNL. Nesta fase, apenas foi possível comparar as presentes argamassas entre si. Foi ensaiado um provete em suporte de tijolo de cada argamassa. Como foi explicado na secção 4.2.5, antes da realização do ensaio, não existia nenhum termo de comparação relativamente ao comportamento de argamassas aplicadas sobre tijolo num ensaio de capilaridade. Definiu-se como critério de paragem o primeiro requisito a ser cumprido de entre dois:

- a frente húmida chegar ao topo do tijolo;
- limitar o ensaio a 2 horas.

Após a realização do ensaio a todas as argamassas, o critério de paragem foram as 2 horas de ensaio. Nenhuma argamassa atingiu a superfície do tijolo. Após o ensaio, foi ainda medida a altura da frente húmida na argamassa. Durante a realização do ensaio, observou-se que a quantidade de água absorvida pelo tijolo é francamente inferior à quantidade de água absorvida pela argamassa; poderá considerar-se que tem um comportamento praticamente estanque face ao da argamassa.

Aparentemente a argamassa é que molhava o tijolo cerâmico, uma vez que a altura da frente húmida na argamassa era muito maior na argamassa do que no tijolo.

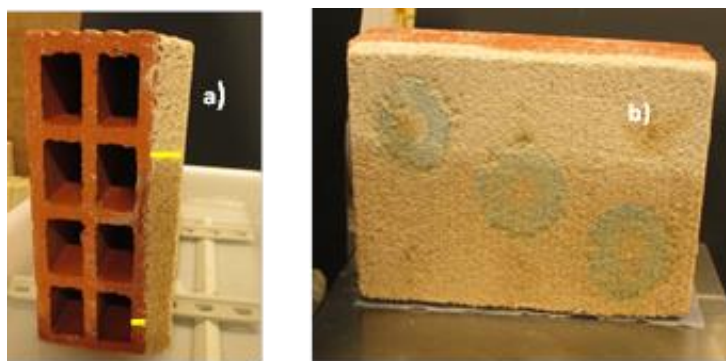


Figura 5.45 - Aspecto do revestimento do tijolo após ensaio de absorção de água por capilaridade: a) altura a que a água atingiu no tijolo e na argamassa; b) frente húmida no revestimento.

A realização deste ensaio assumia alguma importância na avaliação do comportamento da argamassa, não de uma forma isolada, mas sim no conjunto (alvenaria de tijolo e reboco). Com este procedimento, é possível analisar o comportamento da argamassa na presença da água do terreno ou da chuva, por exemplo, indo ao encontro ao referido na tese de Faria (Faria-Rodrigues, 2004), quando afirma: “ *Considera-se que o revestimento pode assegurar a sua função de impermeabilização desde*

que absorva uma quantidade de água suficientemente fraca, de modo que esta possa ser eliminada por evaporação entre os dois períodos de chuva, antes de atingir o interior do edifício”.

Durante a realização do ensaio, foi possível observar a absorção de água pelo reboco aplicado no tijolo, uma vez que corresponde ao escurecimento da cor do reboco (figura 5.45).

Pela análise das curvas do ensaio (figura 5.46), depreende-se que a argamassa com 50% de terra absorveu maior quantidade de água. Contrariamente ao expectável, a argamassa de referência corresponde à segunda argamassa que absorveu maior quantidade de água. Contudo, a argamassa de referência e as argamassas com 10% e 25% de terra possuem um comportamento não muito díspar. A argamassa com 25% de terra revela um comportamento muito competitivo face a todas as argamassas, uma vez que foi a argamassa que absorveu menor quantidade de água.

Após a análise das curvas de ascensão de água por capilaridade, é possível obter o coeficiente de capilaridade (CC), que corresponde ao declive do troço de recta. Como o presente ensaio foi realizado durante duas horas, não foi possível determinar a quantidade máxima de água absorvida; por conseguinte, não se chegou a determinar o valor assintótico (VA).

Quanto maior for o valor de CC, maior será a velocidade de absorção de água. Preferencialmente, são desejáveis argamassas com valores de CC menores.

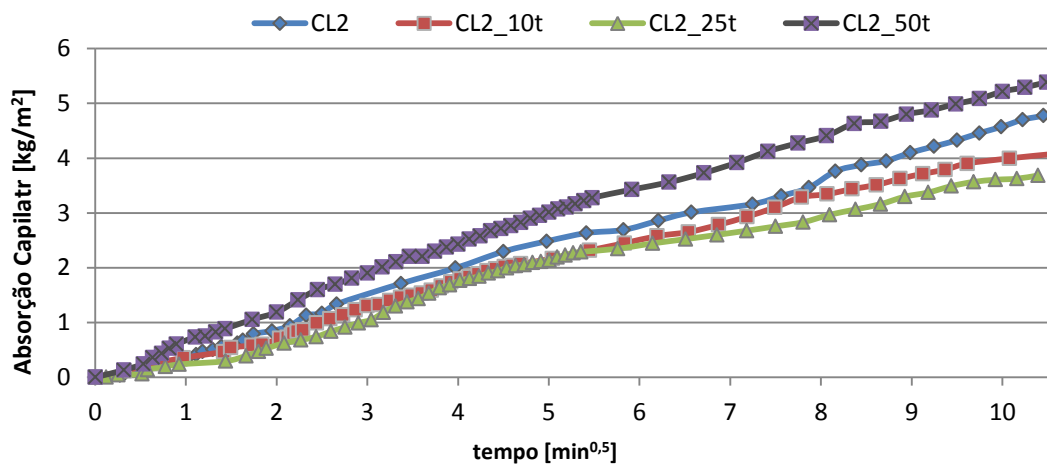


Figura 5.46 - Evolução da absorção de água por capilaridade nas argamassas aplicadas sobre suporte de tijolo com 1 ano de idade de cura.

Os valores de CC de todas as argamassas, ao longo das duas horas de ensaio, podem ser consultados no gráfico de barras da figura 5.47. Como expectável, o maior valor de CC corresponde à argamassa com 50% de terra, seguida da argamassa de referência. A argamassa com 25% de terra tem o menor valor CC. De notar ainda que os valores do coeficiente de capilaridade estão de acordo com

as curvas de capilaridade, durante as 2h do ensaio. De facto, à curva com maior declive corresponde a maior absorção, isto é, o maior valor de CC.

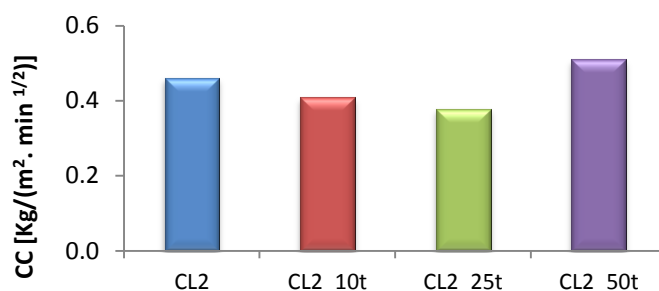


Figura 5.47 - Coeficientes de capilaridade das argamassas aplicadas sobre suporte de tijolo.

- Secagem

O objectivo principal deste procedimento era analisar o comportamento do sistema (tijolo e reboco), durante o ensaio de absorção capilar; no entanto, não se quis deixar de apresentar o ensaio de secagem, que foi simplificado. Considerou-se que a área de secagem corresponde à área do reboco que absorveu água por capilaridade.

Durante a realização do ensaio, foi observada a perda de água do revestimento (naturalmente sob a forma de vapor), que se traduziu no aclaramento da cor do reboco. Genericamente pretende-se produzir umas argamassas que apresentem facilidade de secagem, permitindo uma rápida evaporação da água.

Na figura 5.42 apresenta-se a curva de secagem nas argamassas aplicadas sobre suporte de tijolo, durante as 24 horas do ensaio.

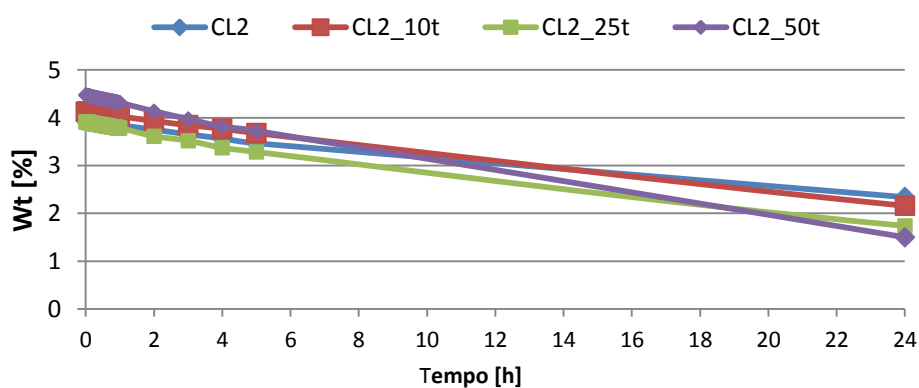


Figura 5.48 - Curvas de secagem no reboco aplicada no tijolo durante 24 h de ensaio.

O presente ensaio foi feito com os provetes em tijolo com 1 ano de idade de cura. Quanto maior a inclinação da curva de secagem, maior será a velocidade de secagem da argamassa. Pela análise das curvas de secagem (figura 5.48) comprova-se que a argamassa com 50% de terra tem uma secagem mais rápida (recta com maior inclinação; no entanto, a argamassa com 25% de terra mostra ser muito competitiva.

A argamassa de referência e a argamassa com 10% de terra apresentam um comportamento muito próximo durante as 24 h de ensaio. Globalmente as argamassas não exibem um comportamento muito díspar.

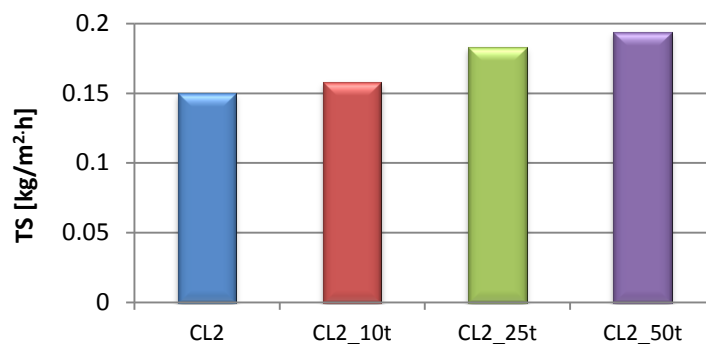


Figura 5.49 - TS do reboco aplicado sobre tijolo.

Após ser traçada a curva de secagem durante as 24h de ensaio, é possível obter a taxa de secagem (TS). O valor obtido ao longo do ensaio traduz a velocidade de secagem de cada argamassa. De acordo com a figura 5.49 quanto maior for a percentagem de terra incorporada na argamassa, maior é a taxa de secagem. A argamassa com 50% de terra apresenta a taxa de secagem mais elevada. A argamassa com 10% de terra e a argamassa de referência apresentam valores muito próximos. Os resultados obtidos no gráfico de barras da TS estão de acordo com o gráfico da curva de secagem anteriormente apresentado (figura 5.48).

5.2.1.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Analogamente aos resultados da porosimetria de mercúrio nos provetes prismáticos, na figura 5.50, apresentam-se os resultados dos provetes em suporte de tijolo.

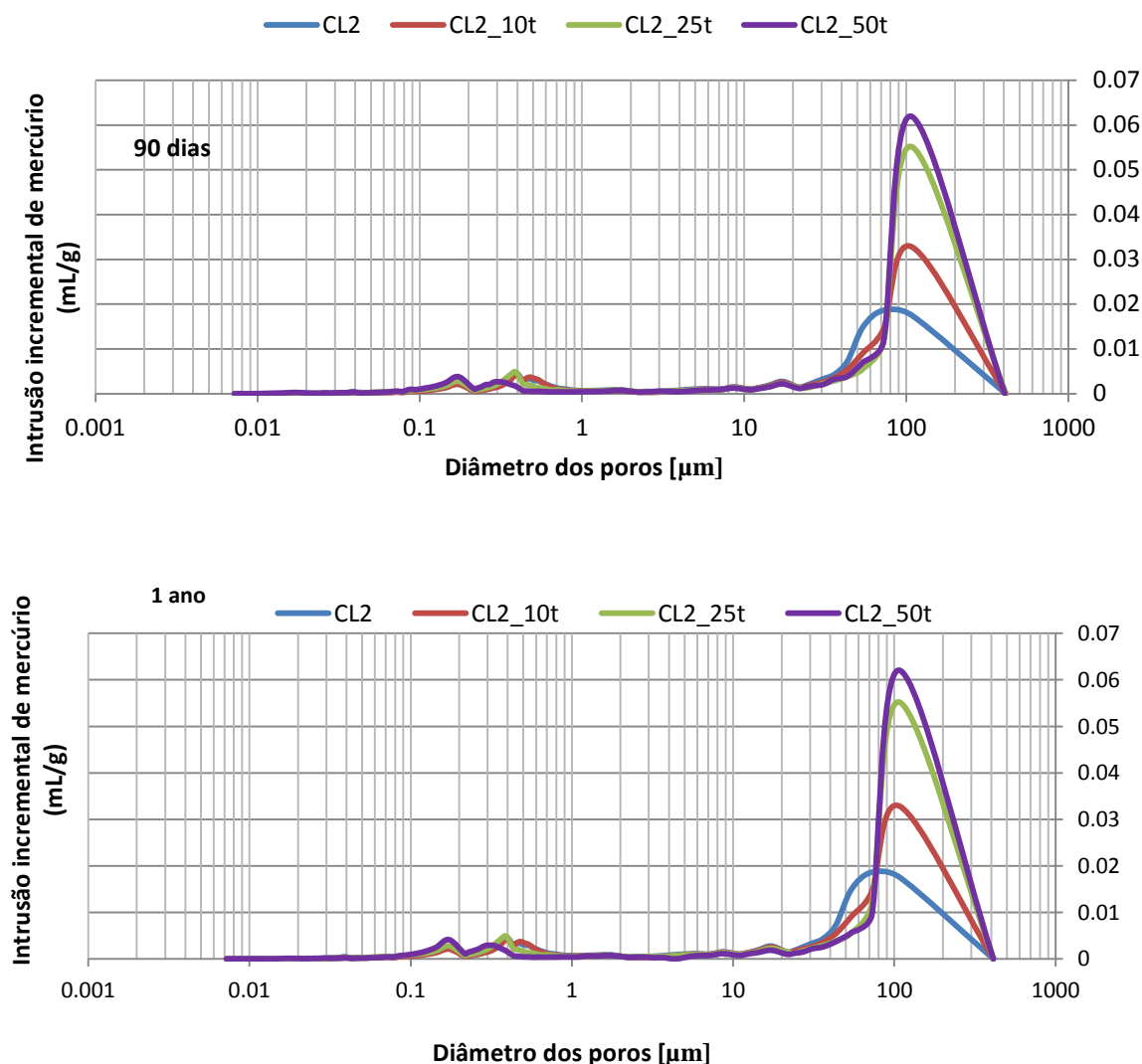


Figura 5.50 - Distribuição do tamanho de poros (por intrusão de mercúrio) das argamassas aplicadas em suporte de tijolo (90 dias e 1 ano de idade de cura).

A figura 5.50 ilustra a evolução da distribuição dos poros, com a introdução de terra em duas idades de cura (90 dias e 1 ano). Nenhuma das argamassas sofreu alterações a nível do tamanho e quantidade de poros com a evolução da idade. A maioria dos poros de todas as argamassas tem dimensões na ordem dos 100 μm , enquanto os poros de menores dimensões possuem diâmetros entre 0.15 e os 0.5 μm . À medida que a quantidade a percentagem de terra aumenta, verifica-se uma diminuição da quantidade de poros de menor diâmetro, excepto na argamassa com 10% de terra, e um aumento da quantidade de poros de maior dimensão.

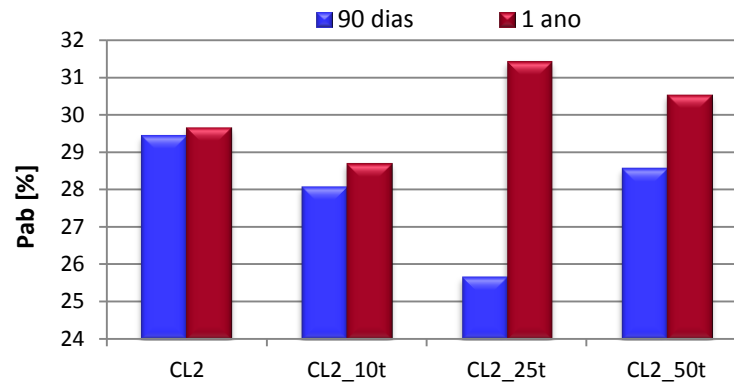


Figura 5.51 - Evolução da porosidade aberta (por porosimetria de mercúrio) nos provetes em suporte de tijolo.

Na figura 5.51 encontram-se exibidos os valores da porosidade aberta, fornecidos pelo ensaio de porosimetria de mercúrio aos 90 dias e 1 ano. Observa-se um aumento da porosidade aberta com a evolução da idade. Na argamassa com 25% de terra destaca-se um grande aumento da porosidade aberta, revelando ser a argamassa com maior valor, seguindo-se a argamassa com 50% de terra. A argamassa com 10% de terra tem o menor valor de porosidade aberta a 1 ano de idade de cura.

5.2.1 Argamassas aplicadas sobre o murete de taipa

As argamassas aplicadas sobre o murete de taipa foram ensaiadas a 1 ano de idade e realizou-se a respectiva comparação com os valores obtidos aos 90 dias. De forma análoga ao sucedido aos 90 dias de idade de cura, não foi possível realizar o ensaio de condutibilidade térmica, porque não foi encontrada uma solução que permitisse realizar o ensaio com a sonda de contacto.

De notar ainda que não foram realizados os mesmos ensaios nos painéis, uma vez que uma parte do murete abateu. Perdeu-se o painel de referência com a argamassa CL2, isto é, a argamassa de cal com traço volumétrico 1:2. Isto aconteceu porque, à semelhança do que aconteceu no ano anterior em que foram colocados painéis de madeira a proteger da chuva o topo Sul do murete (direcção da chuva incidente), este ano o murete não foi protegido; tendo a precipitação sido muito elevada e continuada, essa parte do muro abateu. O abatimento do painel ocorreu entre os dias 7 e 8 de Janeiro de 2014. Acrescente-se que o murete foi realizado no âmbito de um workshop da Associação *Centro da Terra* e não possuía quaisquer fundações, sendo construído directamente sobre o terreno. Aquando da construção de edificações, e como processo de construção da taipa, era comum a realização de fundações em pedra (embasamento em pedra) com o objectivo de proteger as paredes da acção da água, nomeadamente da água do terreno que ascendia por capilaridade. Este requisito é imprescindível para garantir a durabilidade deste tipo de edificações.



Figura 5.52 - Painel da argamassa de referência só de cal abatido

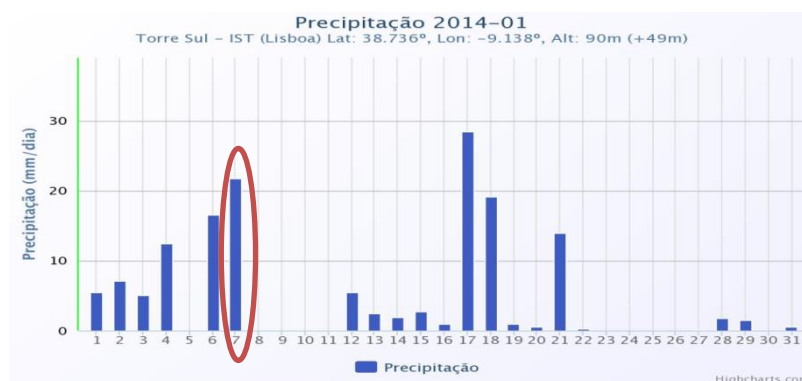


Figura 5.53 - Precipitação mensal ao longo do mês de Janeiro de 2014.
in : <http://meteo.ist.utl.pt/private/ema/emaEstat.php?param=pp&month=01&year=2014&period=monthly>

A figura 5.53 mostra a precipitação, em Lisboa, ao longo do mês de Janeiro de 2014 (caracterizado por chuvas de grande intensidade). Como se constata, é notória a intensa pluviosidade ocorrida no dia 7 de Janeiro, bem como as condições meteorológicas invernosas nos dias anteriores.

5.2.1.1 Dureza superficial por durómetro de Shore A

Na figura 5.54 encontram-se os valores da dureza superficial, em todos os painéis do murete de taipa, resultantes do método do durómetro. Verificam-se grandes desvios-padrão nas diversas leituras, quer aos 90 dias, quer a 1 ano de idade, para cada uma das argamassas. Por este motivo e sabendo que o durómetro é mais adequado para materiais mais deformáveis, os resultados são interpretados com algum grau de incerteza. No entanto, apesar das dificuldades encontradas, é possível encontrar uma tendência nos resultados. Genericamente, com a evolução da idade de cura é visível um aumento, embora não muito acentuado, da dureza superficial ao longo de todo o painel, excepto na argamassa CL3. Tanto aos 90 dias como a 1 ano verifica-se que a dureza do reboco CL2 e CL2_25t é da mesma ordem de grandeza, embora superior na argamassa com 25% de terra. Também a dureza superficial na argamassa com 10% de terra, em substituição de areia fina (CL3_10t (arf)), é da mesma ordem de grandeza da argamassa CL3.

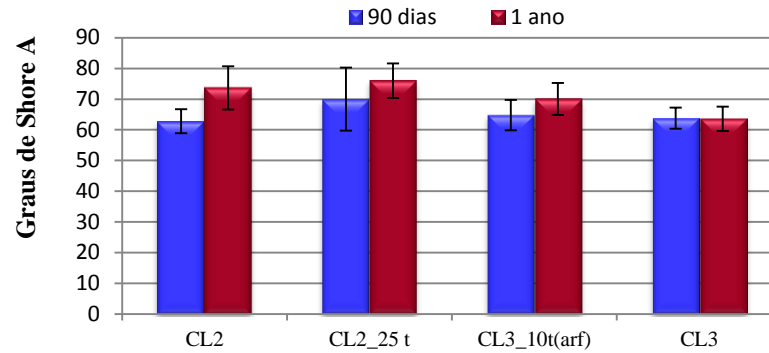


Figura 5.54 - Dureza superficial por durómetro das argamassas aplicadas em muretes de taipa aos 90 dias e 1 ano.

A dureza superficial, obtida através do durómetro de Shore A, foi medida em três níveis diferentes (base, parte intermédia e topo). Constata-se que a parte intermédia do reboco dos painéis centrais apresenta os maiores valores de dureza superficial – figura 5.55. Nos painéis de extremidade, CL2 e CL3, os valores mais elevados de dureza superficial são obtidos no topo e na base do murete, respectivamente.

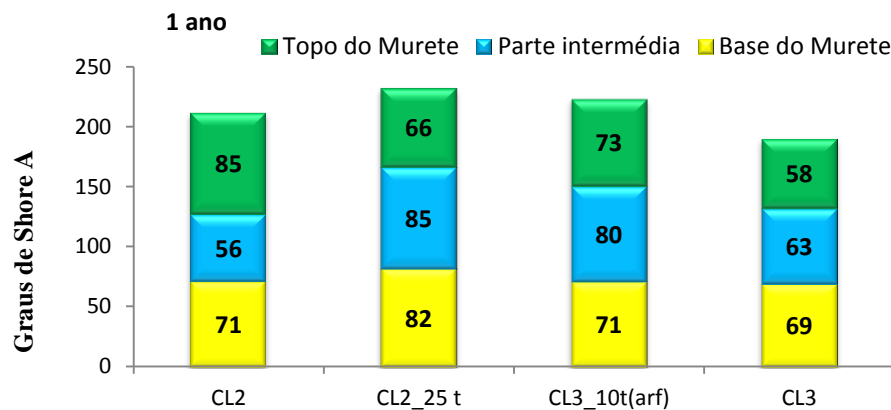


Figura 5.55 - Valores da dureza superficial na base, a meia altura e no topo de argamassas aplicadas em muretes de taipa.

5.2.1.2 Resistência superficial por esclerómetro pendular dos rebocos do murete

Com recurso ao esclerómetro pendular, foram efectuadas medições ao longo de todo o reboco do murete (4 painéis). Em cada painel foram feitas 3 medições, ao longo dos 3 níveis (base, parte intermédia e topo). Na figura 5.56, são apresentados os valores médios da resistência superficial através do esclerómetro pendular, em duas idades de cura: 90 dias e 1 ano.

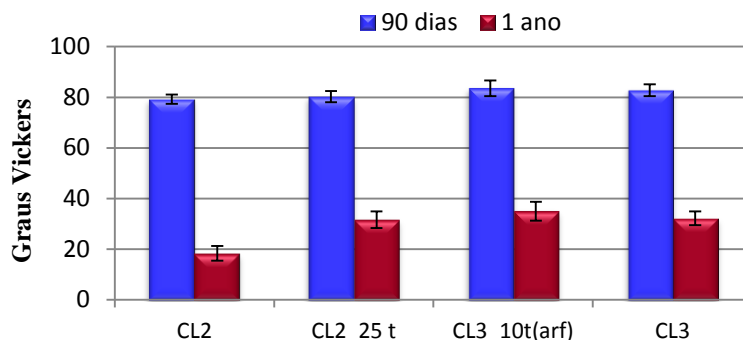


Figura 5.56 - Valores médios da resistência superficial das argamassas aplicadas no murete de taipa aos 90 dias e 1 ano.

Pela análise da figura 5.56, verifica-se que houve uma diminuição da resistência superficial ao longo de todo o murete. Contudo, mantém-se a tendência dos 90 dias para 1 ano de idade. É visível a diminuição global da resistência superficial com a evolução da idade. Saliente-se que as argamassas com terra apresentam maiores valores, o que pode trazer vantagens, nomeadamente ao nível do choque superficial a que comumente o reboco está sujeito. É ainda importante referir que, no momento da realização do ensaio, foi possível ouvir um som oco, resultante do choque da esfera no reboco, no painel com a argamassa CL2. Inclusive, neste mesmo painel, parte do reboco destacou-se do suporte.

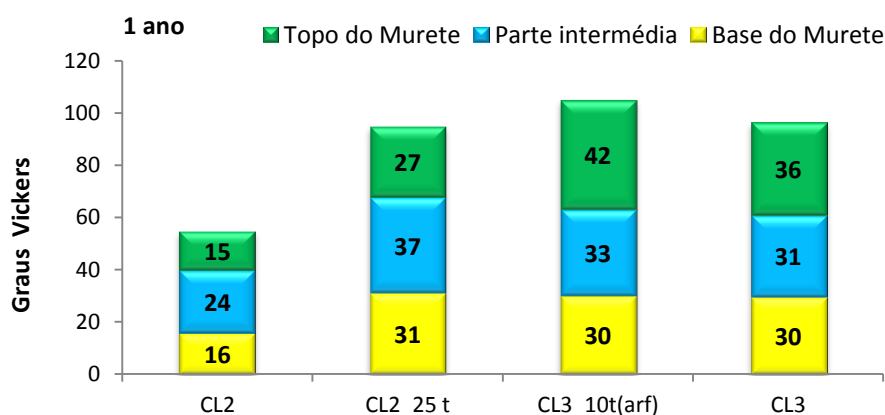


Figura 5.57 - Dureza superficial do reboco do murete com 1 ano. Medição realizada a 3 níveis no murete: base, parte intermédia e topo.

A dureza superficial, ao longo dos 3 níveis (base, parte intermédia e topo), é revelada na figura 5.57. Globalmente as argamassas com terra têm maiores valores de resistência superficial. É possível verificar, ainda, que a resistência superficial diminui de cima para baixo, nos painéis CL3_10t (arf) e CL3 do topo para a base E, nos painéis CL2 e CL2_25t, da parte intermédia para a base do reboco do murete. Os menores valores da resistência superficial do reboco da base do murete podem ser

justificados pelo facto de o murete, tal como já referido, ter sido construído directamente sobre o terreno, não estando protegido da humidade do terreno, ascendente por capilaridade.

5.2.1.3 Velocidade de propagação dos ultrassons do reboco do murete

No momento da execução do ensaio de propagação de velocidade de ultrassons, o murete já tinha abatido, por isso, não foi possível realizá-lo no painel com a argamassa CL2.

Os valores médios obtidos no presente ensaio encontram-se na figura 5.58. Em cada nível dos painéis foram efectuadas 3 medições.

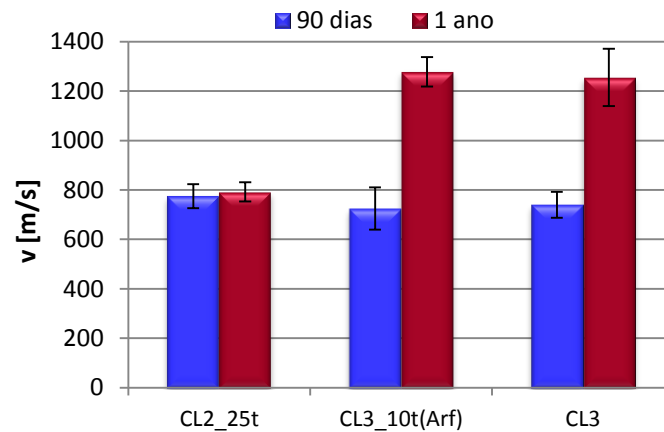


Figura 5.58 - Velocidade de propagação de ultrassons no reboco do murete de taipa com 90 dias e 1 ano.

Partindo da análise da figura constata-se que existe um aumento da velocidade de propagação de ultrassons nas argamassas CL2_25t, CL3_10t(Arf) e CL3 com a evolução da idade dos 90 dias para 1 ano. Presume-se que haja maior compacidade, uma vez que a velocidade é superior. Salienta-se o facto de as condições de humidade ambiente poderem influenciar os resultados.

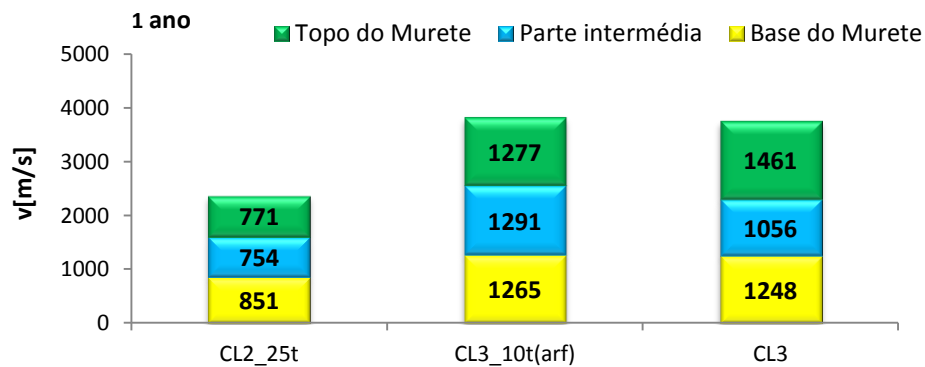


Figura 5.59 - Velocidade de propagação de ultrassons no reboco aplicado no murete de taipa com 1 ano. O ensaio foi realizado em três níveis do murete (base, parte intermédia e topo).

Os valores médios da velocidade de propagação de ultrassons nos vários níveis no reboco do murete de taipa com 1 ano de idade de cura constam da figura 5.59. Genericamente, o reboco dos painéis com traço volumétrico 1:3 apresenta maior velocidade de propagação de ultrassons. Nestes painéis é ainda possível constatar que estas argamassas possuem menor velocidade de propagação de ultrassons nas zonas intermédias, o que poderá significar que, possivelmente, são menos compactas nessas zonas. No painel com a argamassa CL2_25t, a velocidade de propagação de ultrassons é maior na base do reboco.

5.2.1.4 Absorção de água sob baixa pressão por tubos de Karsten do reboco no murete

É importante salientar que, quando foi realizado este ensaio *in situ*, nas argamassas com 1 ano de idade de cura, apesar de estar tempo seco, nos dias anteriores as condições meteorológicas foram de dias invernosos, acompanhados por chuva. Este facto pode ter influenciado os resultados.

O resultado do ensaio de absorção de água sob baixa pressão, ao fim de cada intervalo de tempo de 5, 10 e 15 minutos de ensaio, encontra-se expresso na figura 5.60.

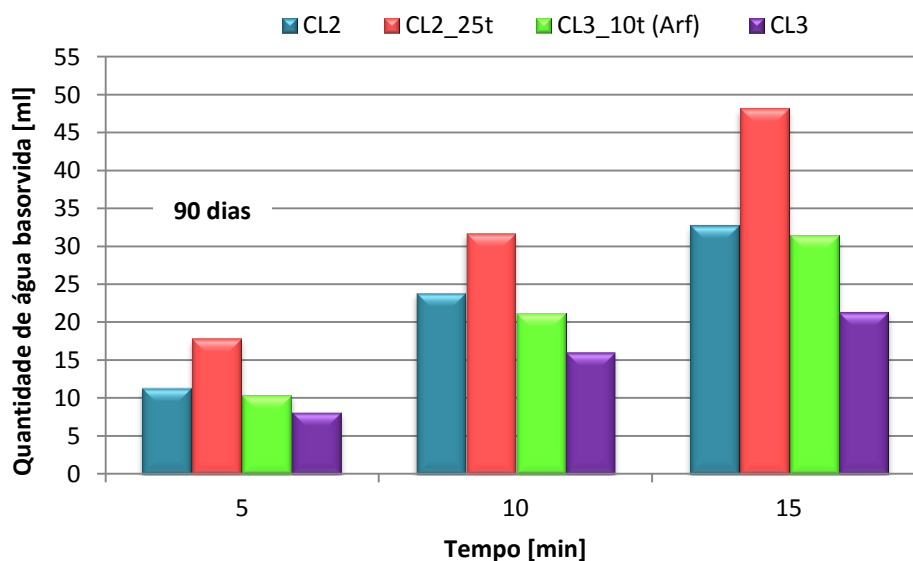


Figura 5.60 - Absorção de água sob baixa pressão dos rebocos de argamassa aplicadas no murete de taipa, aos 90 dias.

Da figura 5.60 constata-se, como expectável, uma absorção de água crescente ao longo do tempo. As argamassas com terra (painéis centrais) absorvem maior quantidade de água do que as respectivas argamassas de referência. Segundo Jamú (2013), os valores elevados de absorção de água aos 90 dias devem-se à absorção de água feita pelo suporte de taipa. Este suporte, feito com terra argilosa, absorve maior quantidade de água do que o suporte de tijolo cerâmico.

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos a 1 ano de idade de cura (figura 5.61). O gráfico de barras da figura 5.61 corresponde ao valor médio obtido para cada argamassa. Como anteriormente mencionado, no momento da realização do ensaio o painel com a argamassa CL2 já tinha abatido. Contudo, na tentativa de poder analisar o comportamento em presença da água da argamassa CL2, recolheu-se uma amostra do reboco que estava na zona onde o painel abateu. Para poder comparar este resultado com a argamassa com 25% de terra, foi extraída uma amostra do reboco do murete. Deste modo, foi possível realizar o ensaio com o tubo de Karsten na posição vertical (figuras 5.63 e 5.64).

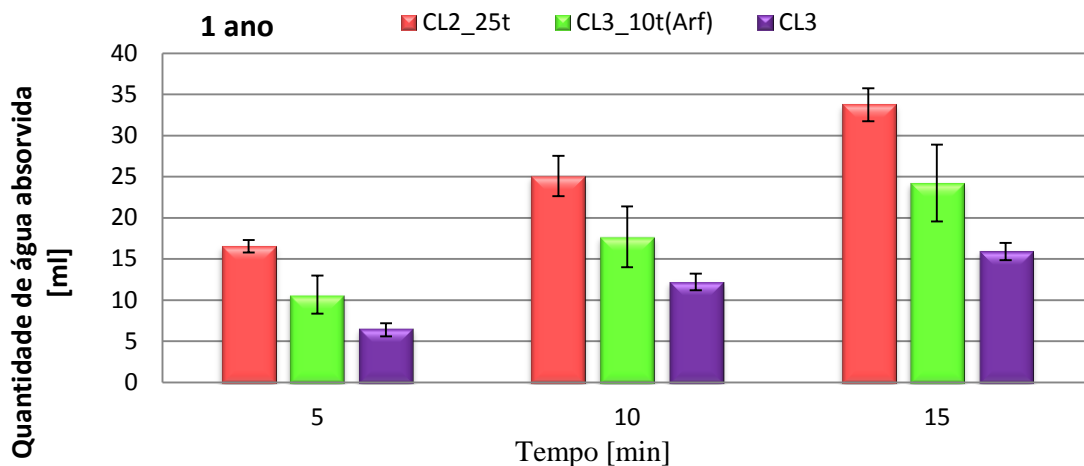


Figura 5.61 - Absorção de água sob baixa pressão dos rebocos de argamassa aplicadas no murete de taipa, com 1 ano de idade de cura.

De acordo com as figuras 5.60 e 5.61, verifica-se que se mantém a tendência de absorção de água, ou seja, as argamassas com terra (CL2_25t e CL3_10t (Arf)) absorvem maior quantidade de terra que a argamassa CL3, só de cal. Observa-se ainda que a quantidade de água total absorvida diminui, principalmente aos 15 minutos de ensaio, tendo essa diminuição sido mais evidente na argamassa CL2_25t.

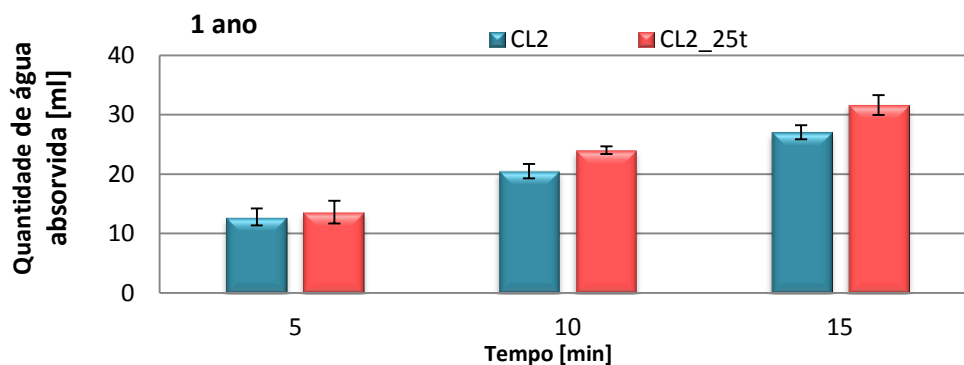


Figura 5.62 - Absorção de água sob baixa pressão em amostras recolhidas do painel de taipa com 1 ano de idade de cura.

Pelos resultados da figura 5.62, cujo ensaio foi feito com amostras de reboco e com os tubos de Karsten na posição vertical, tal como expectável, constata-se que o reboco da argamassa com 25% de terra absorve maior quantidade de água do que a argamassa de referência. Neste caso verifica-se uma menor absorção de água da argamassa com 25% de terra recolhida do painel do que quando se realiza o ensaio com o reboco aplicado no murete (figura 5.64).

Na figura 5.63 pretende-se mostrar, de uma forma resumida, o ensaio realizado com os tubos de kartens no reboco aplicado no murete de taipa e o ensaio realizado na amostra de argamassa do murete.



Figura 5.63 - a) Amostra de reboco do painel CL2; b) plasticina (considerada estanque) utilizada no ensaio com os tubos de Karsten c) ensaio com tubo de Karsten realizado na amostra de reboco recolhida do murete; d) ensaio com o tubo de Karsten realizado no murete.

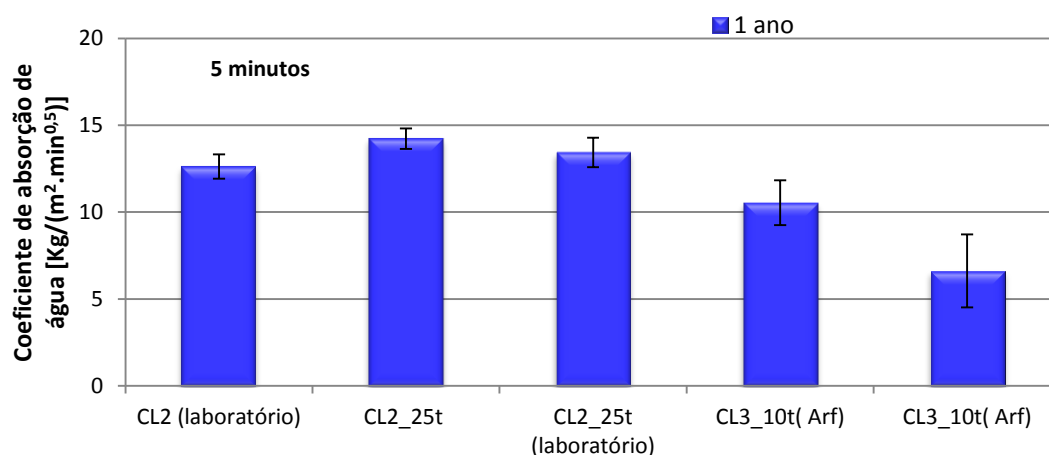


Figura 5.64 - Coeficiente de absorção de água após 5 minutos de ensaio no reboco aplicado no murete de taipa com 1 ano de idade de cura.

Na figura 5.64 encontram-se os coeficientes de absorção de água, após 5 minutos de ensaio com os tubos de Karsten, obtidos para as diferentes argamassas. A designação “laboratório” permite identificar as amostras de reboco do murete, cujo ensaio foi realizado em laboratório e com o tubo de Karsten na vertical. A argamassa CL2 (laboratório) apresenta uma absorção mais lenta que a

argamassa CL2_25t (laboratório). Este resultado já era esperado porque, de acordo com a figura 5.63, esta argamassa absorveu menor quantidade de água aos 5 minutos e, subsequentemente, tem uma absorção mais lenta. A comparação dos coeficientes de absorção de CL2_25t (laboratório) e CL2_25t, ou seja, da mesma argamassa, e cujo ensaio foi realizado através da recolha do reboco e outra *in situ* no reboco aplicado no murete, está coerente com os resultados representados na figura 5.61 e 5.62.

Verifica-se que o coeficiente de absorção de água (aos 5 minutos) mantém a mesma tendência anteriormente identificada, isto é, obtém-se uma maior absorção de água na argamassa aplicada no suporte.

A presença do murete de taipa conduz a uma maior absorção de água. Como expectável, a argamassa CL3 possui um menor coeficiente de absorção de água comparativamente com a argamassa com terra CL3_10t (Arf).

5.2.1.5 Ensaio de Capilaridade por Contacto

Seguidamente apresentam-se os resultados do ensaio de capilaridade e secagem realizado no LNEC para dois rebocos aplicados no murete de taipa (CL2 e CL2_25t). A recolha de 3 amostras de cada reboco permitiu traçar as curvas de ascensão de água por capilaridade (figura 5.65). Após traçadas estas curvas é possível obter o coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (VA). É importante referir que este ensaio não tinha sido realizado anteriormente por Jamú (2013) nem por Dias (2013) e consequentemente os resultados obtidos apenas podem ser comparados entre si, a 1 ano de idade.

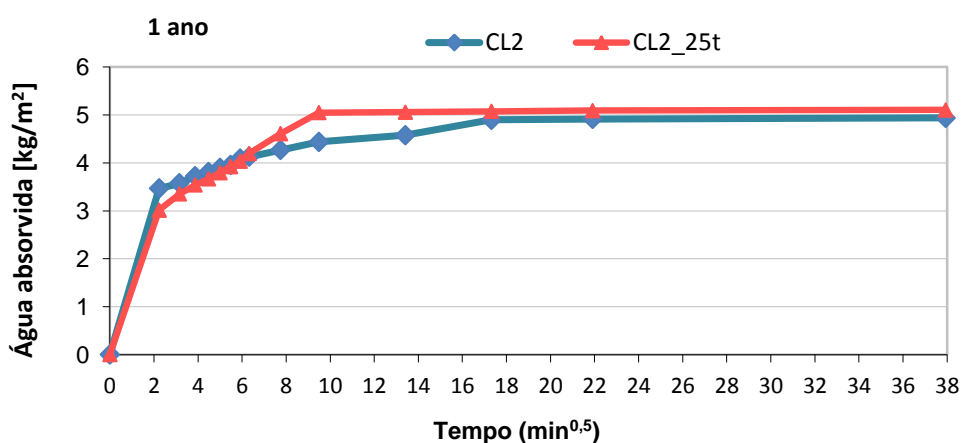


Figura 5.65 - Evolução da absorção de água por capilaridade nas argamassas recolhidas do murete de taipa com 1 ano de idade.

Analisando a curva de absorção de água por capilaridade – figura 5.65, conclui-se que a argamassa possuidora de maior valor assintótico é a argamassa CL2_25t e, simultaneamente, a argamassa CL2 é que absorve menor quantidade de água. Contudo, a quantidade máxima de água absorvida é semelhante nas duas argamassas.

Quadro 5.16 - Coeficiente de capilaridade aos 5 min de ensaio e valor assintótico nas argamassas recolhidas do murete de taipa com 1 ano de idade de cura.

Argamassa	Capilaridade			
	CC 5 min [Kg/m ² .min ^{1/2}]		VA [Kg/ m ² .h]	
	Med	DP	Med	DP
CL2	1,55	0,24	4,94	0,63
CL2_25t	1,35	0,14	5,11	0,47

Pela análise do quadro 5.16, constata-se que o reboco com a argamassa de referência tem maior valor de CC aos 5 minutos de ensaio, comparativamente à argamassa de referência. Este valor está de acordo com o gráfico da figura 5.65, uma vez que o CC_{5 min} corresponde ao declive do troço inicial entre o ponto 0 e os 5 minutos. Relativamente aos valores de VA, embora a argamassa com 25% de terra tenha um valor superior, este está muito próximo da argamassa de referência, CL2.

5.2.1.6 Secagem

Foi traçada a curva de secagem de cada reboco recolhido do murete, a qual traduz o teor em água (Wt em %) em função do tempo (em horas), tal como se encontra na figura 5.66.

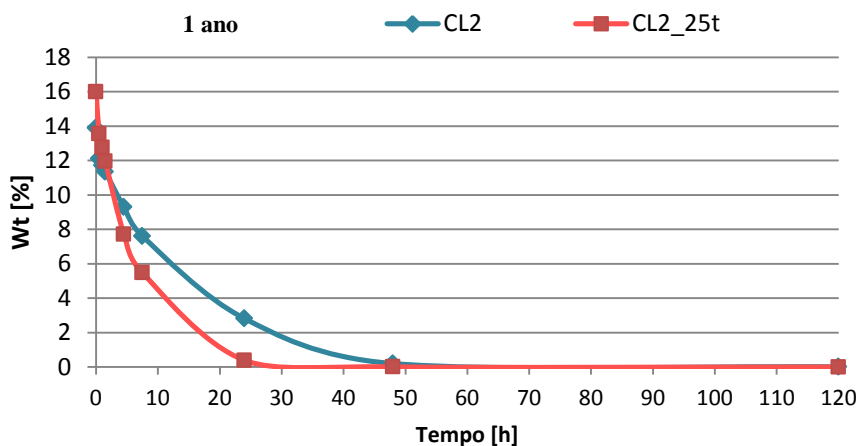


Figura 5.66 - Curva de secagem (reboco recolhido do murete de taipa).

Pela análise da figura 5.66 verifica-se que a argamassa com 25% de terra tem uma secagem mais rápida do que a argamassa de referência. É importante que o reboco aplicado permita a evaporação de água e, consequentemente, a secagem da parede.

Após traçadas as curvas de secagem foi possível determinar dois parâmetros fundamentais: a taxa de secagem (TS) e o índice de secagem (IS). Estes resultados encontram-se expressos no quadro

5.17. Para uma análise mais simples e objectiva, apresentam-se estes resultados nos gráficos de barras da figura 5.67.

Quadro 5.17 - Valores médios e desvio padrão da taxa de secagem e índice de secagem do reboco recolhido do murete de taipa com 1 ano de idade de cura.

Argamassa	Secagem			
	TS (Kg/(m ² .h))		IS [-]	
	Med	DP	Med	DP
CL2	0.32	0.05	0.46	0.06
CL2_25t	0.58	0.07	0.41	0.04

De um modo global, pretende-se que as argamassas tenham maiores valores de taxa de secagem e menores valores de índice de secagem. Como já mencionado nesta dissertação, a taxa de secagem corresponde à velocidade de secagem inicial, enquanto o índice de secagem traduz a facilidade de secagem global.

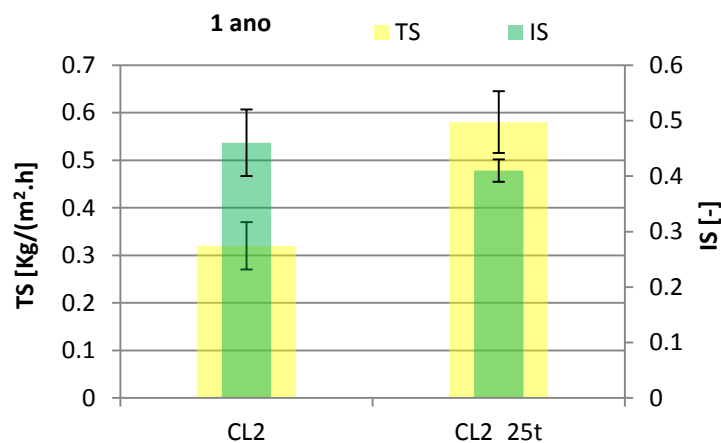


Figura 5.67 - Taxa de secagem e índice de secagem no reboco recolhido do murete de taipa.

O gráfico da figura 5.67 permite observar que o reboco com 25% de terra apresenta um melhor comportamento que a argamassa de referência, revelando que a argamassas com 25% de terra é bastante competitiva. De facto, a argamassa CL2_25t possui um maior valor de TS e um menor valor de IS.

5.2.1.7 Resistência à compressão confinada

O ensaio de resistência à compressão confinada foi realizado no LNEC, em duas das amostras de reboco recolhidas do painel de taipa (CL2 e CL2_25t). Analogamente ao sucedido anteriormente, também o presente ensaio não foi realizado pelas autoras Jamú (2013) e Dias (2013) e, subsequentemente, os resultados apenas podem ser comparados entre si a 1 ano de idade. O quadro 5.18 regista os valores médios e desvios-padrão obtidos.

Quadro 5.18 - Valores médios e desvio padrão da resistência à compressão confinada de amostras de reboco retiradas do painel de taipa com 1 ano de idade de cura.

Argamassa	Rc [MPa]	
	Med	DP
CL2	1.7	0.38
CL2_25t	1.1	0.03

Note-se que o elevado valor do desvio padrão da argamassa CL2 poderá estar associado ao facto de, nas três amostras do mesmo reboco, não ter sido utilizada a mesma célula de carga. Na primeira amostra, foi utilizada uma célula de carga de 2 kN, enquanto nas outras duas foi utilizada uma célula de carga de 200 kN.

Analisando o quadro 5.18 conclui-se que a resistência à compressão confinada diminui com a introdução de terra. Esta diminuição era expectável porque está-se a substituir um ligante (cal aérea) por terra argilosa.

5.2.1.8 Porosimetria de Mercúrio

Apresentam-se, de seguida, os resultados obtidos por porosimetria de mercúrio das argamassas recolhidas do murete de taipa (figura 5.68).

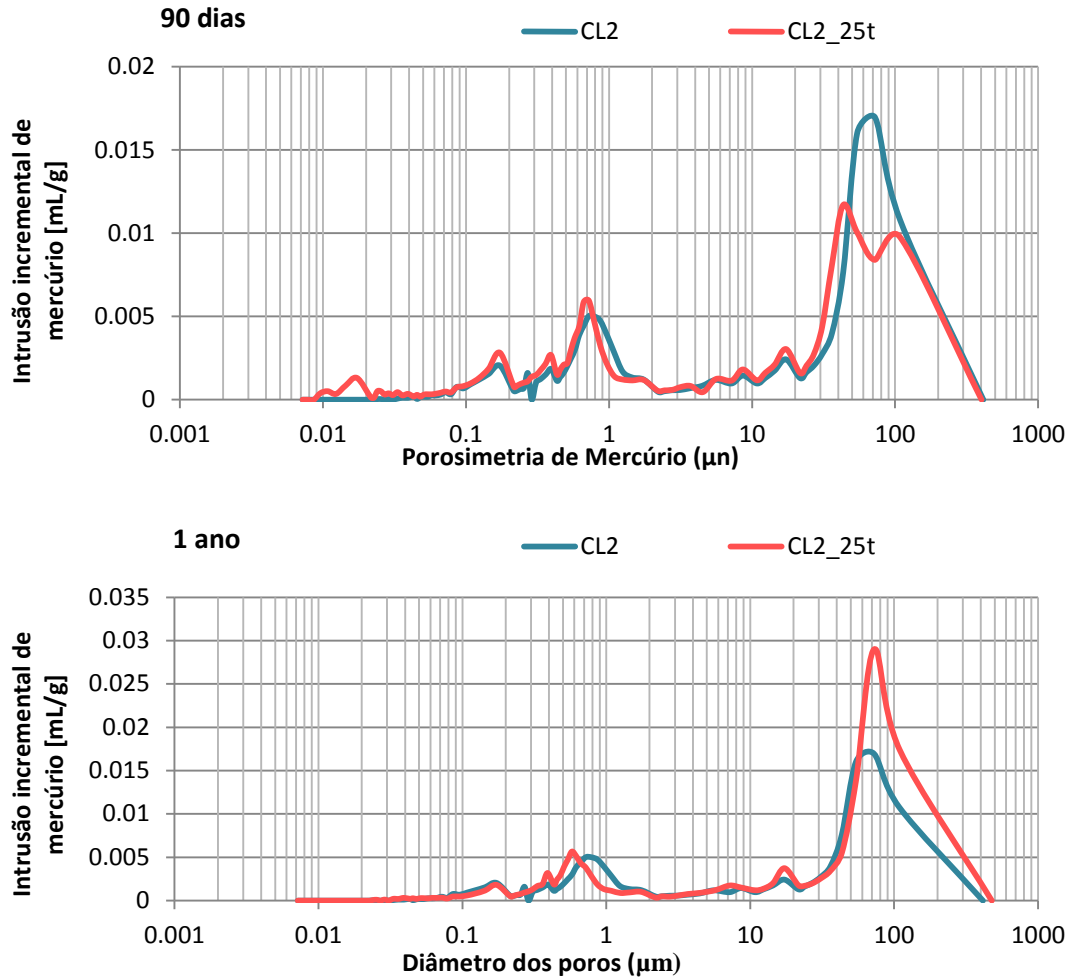


Figura 5.68 - Distribuição do tamanho de poros por intrusão de mercúrio do reboco aplicado no murete de taipa. (90 dias e 1 ano).

Analisando a figura 5.68, aos 90 dias, é possível verificar que as argamassas apresentam poros com dimensões semelhantes. Contudo, genericamente, a argamassa de referência apresenta maior quantidade de poros. As argamassas apresentam maior quantidade de poros na gama dos 70-100 μm , naturalmente, com maior quantidade na argamassa de referência. A argamassa com 25% de terra possui um volume elevado de poros com diâmetro na ordem dos 45 μm , mas também na gama dos 100 μm . Esta situação pode justificar-se por duas razões possíveis: a existência de poros de maiores dimensões que são só acessíveis por estes poros de menores ou, em alternativa, a argamassa possui efectivamente poros com estas dimensões. Para se despistar esta dúvida, este ensaio devia ter sido repetido para a argamassa CL2_25t aos 90 dias de idade de cura, o que não foi possível. Os poros de menores dimensões da argamassa de referência e da argamassa com 25% de terra estão compreendidos entre os 0.15 e os 0.75 μm para ambas as argamassas.

Com a evolução da idade de cura, as argamassas apresentam alterações na sua estrutura porosa. A argamassa CL2 com 1 ano de idade continua a apresentar poros de maiores dimensões, com cerca de 70 μm ; todavia, o volume de poros nesta gama de diâmetro diminui com a evolução da idade. O volume de poros de menores dimensões (entre 0.15 e 0.8 μm) diminui.

Nas argamassas com 25% de terra, e contrariamente ao verificado aos 90 dias, observa-se um grande volume de poros de maiores dimensões com cerca de 75 μm de diâmetro. A gama de poros com menores dimensões encontra-se mais estreita, entre os 0.15 e os 0.6 μm . Resumidamente, a 1 ano de idade, a introdução de terra nas argamassas conduz a um aumento de volume de poros com maiores dimensões.

O presente ensaio obteve-se também os valores da porosidade aberta. A evolução da porosidade aberta dos 90 dias para 1 ano de idade de cura no reboco aplicado no murete encontra-se reflectida na figura 5.69.

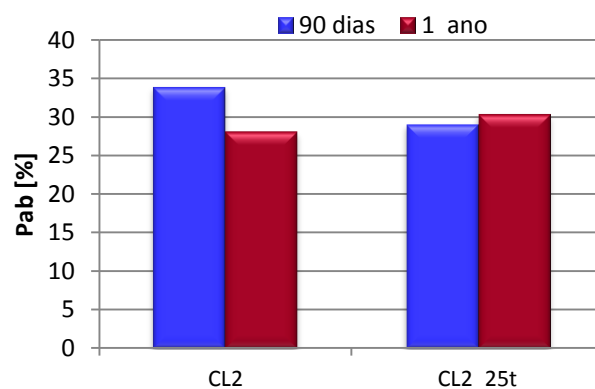


Figura 5.69 - Evolução da porosidade aberta (por porosimetria de mercúrio) nos provetes em suporte de tijolo.

O ensaio de porosimetria de mercúrio fornece também os valores de porosidade aberta (Pab). Na figura 5.69, encontra-se a evolução da porosidade aberta com a idade. Constatou-se que aos 90 dias a argamassa de referência apresenta a maior Pab. Porém, a 1 ano de idades estes resultados invertem-se, sendo a argamassa com terra a que tem maior valor de porosidade aberta.

5.2.1.9 Termografia

Os ensaios no murete de taipa foram realizados após 1 ano de idade de cura. No entanto, antes da realização destes, o reboco foi observado visualmente. Em Dezembro de 2013 e Janeiro 2014, a observação visual foi complementada com termogramas (figura 5.70).

A termografia foi um dos ensaios realizados *in situ* no reboco do murete de taipa. A câmara termográfica converte a radiação infravermelha em temperatura. Com efeito, as diferentes

temperaturas são indicadas numa gama distinta de cores. Neste caso, as cores com tonalidade de azul indicam temperaturas mais baixas e, em oposição, as cores com tonalidade de vermelho indicam temperaturas mais elevadas. Assim, na área do reboco do murete é possível comparar as temperaturas (figura 5.70).

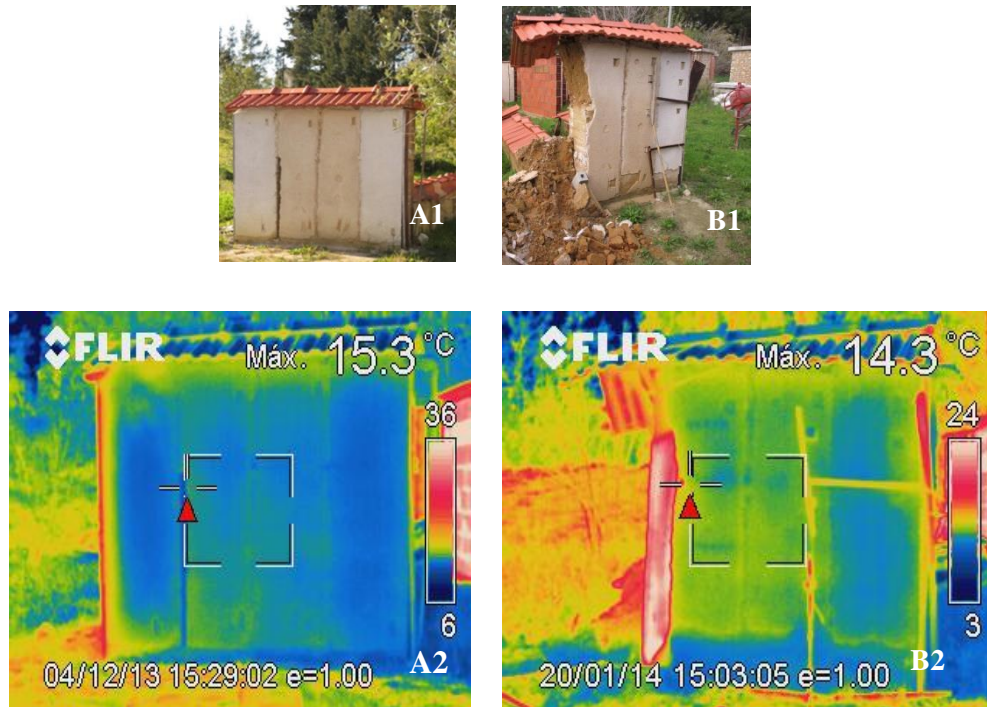


Figura 5.70 - Termogramas do reboco do murete de taipa : A2- antes do abatimento do painel de extremidade esquerdo com argamassa CL2; B2-após o abatimento do painel ;A1 e B1- fotografias do murete.

De acordo com a figura 5.70 – A2 e B2, constata-se grandes diferenças ao nível de temperaturas do reboco do murete. Enquanto na figura A2 existe uma distribuição uniforme de baixas temperaturas ao longo de toda a superfície do reboco, o mesmo não acontece na figura B2. De facto, no dia 20 Janeiro, para além de já ter ocorrido o abatimento do painel de extremidade, como anteriormente explicado na secção 5.2.3, e que se visualiza na figura 5.70-B2, é possível também constatar que a base do murete apresenta temperaturas inferiores a parte intermédia e ao topo de reboco. De facto, visualmente, era também possível observar áreas mais escuras junto à base. Este facto é facilmente compreensível (e de acordo com a secção 5.2.3), uma vez que o murete foi construído sobre o terreno estando, naturalmente, sujeito à humidade do terreno que ascende por capilaridade.

5.3 Síntese dos Resultados Obtidos

Nos quadros 5.19 e 5.20 apresentam-se os principais resultados globais dos ensaios efectuados com os provetes prismáticos e com as argamassas aplicadas sobre o suporte (tijolo cerâmico e murete

de taipa, respectivamente). Obviando a necessidade de consultar outras dissertações, apresentam-se os resultados, não só com 1 ano de idade de cura, mas também com 90 dias.

Quadro 5.19 - Resumo dos principais resultados obtidos nos provetes prismáticos (90 dias e 1 ano de idade de cura).

		Argamassas							
		CL2		CL2_10t		CL2_25t		CL2_50t	
		Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP
Caracterização no Estado Endurecido	Provetes Prismáticos	Ensaio	Idade						
		λ (W/m.k)	90 dias	0,74	0,01	0,77	0,01	0,73	0,01
			1 ano	0,77	0,03	0,72	0,03	0,73	0,05
		MV_a (kg/m ³) *	90 dias	1757,30	51,24	1749,65	16,67	1784,13	34,60
			1 ano	1690,30	45,30	1678,10	28,10	1664,40	52,03
		Ed (MPa)	90 dias	2902,00	96,79	2914,08	84,13	2662,00	68,56
			1 ano	3172,25	44,67	2815,92	53,98	2688,58	94,27
		Rt (MPa)	90 dias	0,33	0,02	0,35	0,02	0,31	0,02
			1 ano	0,38	0,01	0,31	0,03	0,29	0,03
		Rc (MPa)	90 dias	0,70	0,14	0,72	0,02	0,57	0,03
			1 ano	0,68	0,04	0,66	0,02	0,54	0,03
		CC (kg/(m ² . min ^{1/2}))	90 dias	3,78	0,18	3,24	0,17	3,70	0,17
			1 ano	3,38	0,46	3,01	0,44	3,02	0,17
		VA (kg/ m ²)	90 dias	19,68	0,65	20,25	0,60	20,94	0,27
			1 ano	18,35	0,22	17,07	0,51	16,76	0,11
		TS (kg/(m ² . h))	90 dias	0,36	0,01	0,33	0,01	0,33	0,06
			1 ano	0,23	0,01	0,20	0,03	0,25	0,01
		IS (-)	90 dias	0,20	0,02	0,20	0,01	0,22	0,03
			1 ano	0,19	0,01	0,19	0,01	0,16	0,01
		Pab (%) **	90 dias	29,42	0,80	30,93	0,41	30,31	0,61
			1 ano	22,81	0,12	21,96	0,16	22,47	0,18
		Δm 20c (%)	90 dias	51,05	2,74	47,57	1,77	62,92	4,51
			1 ano	47,53	2,20	59,29	4,00	67,16	8,60

*Valor obtido através do método geométrico

** Valor obtido através do método do exsiccador

Quadro 5.20- Resumos dos principais resultados obtidos as argamassas aplicadas sobre tijolo e sobre o murete de taipa

			Argamassas									
			CL2		CL2_10t		CL2_25t		CL2_50t			
			Ensaio	Idade	Med	DP	Med	DP	Med	DP	Med	DP
Caracterização no Estado Endurecido	Provetes em Tijolo	DS [Graus Shore A]	90 dias	65,70	9,23	62,90	11,67	63,50	10,67	52,40	17,55	
			1 ano	69,00	9,20	58,80	6,42	62,20	5,49	60,00	7,47	
		λ [W/m.k]	90 dias	0,42	0,06	0,52	0,09	0,62	0,16	0,56	0,08	
			1 ano	0,56	0,06	0,48	0,06	0,51	0,02	0,58	0,02	
		V_{us} [m/s]	90 dias	936,12	108,80	918,42	360,97	892,41	346,38	892,97	347,89	
			1 ano	1005,66	161,51	952,79	112,89	945,11	157,98	1014,74	238,40	
		Qt abs, 5 mim [ml]	90 dias	2,70	0,90	8,20	3,20	7,70	1,20	14,10	4,50	
			1 ano	9,40	1,84	10,27	2,45	12,30	3,52	30,73	7,49	
		CC [Kg/(m ² .mim ^{0,5})]	1 ano	0,46	-	0,41	-	0,38	-	0,51	-	
	TS [kg/(m ² .h)]	1 ano	0,15	-	0,16	-	0,18	-	0,19	-		
	Provetes em Tijolo	DS [Graus Shore A]	90 dias	63,00	8,00	-	-	70,00	20,00	-	-	
			1 ano	74,00	14,00	-	-	76,00	11,00			
		RS [Graus Vickers]	90 dias	79,00	4,00	-	-	80,00	4,00	-	-	
			1 ano	18,00	6,00	-	-	32,00	7,00	-	-	
		CC [Kg/(m ² .mim ^{0,5})]	1 ano	1,55	0,24	-	-	1,35	0,14	-	-	
		VA [Kg/ m ²]	1 ano	4,94	0,63	-	-	5,11	0,47	-	-	
		TS [kg/(m ² .h)]	1 ano	0,32	0,05	-	-	0,58	0,07	-	-	
IS [-]		1 ano	0,46	0,06	-	-	0,41	0,04	-	-		

É interessante avaliar a influência da introdução da terra caulinítica nas argamassas, ou seja, as vantagens e inconvenientes da introdução da terra como substituto de igual massa de ligante (cal aérea). Os quadros seguintes (5.21, 5.22 e 5.23) comparam os resultados das argamassas com terra (10%, 25% e 50%) com a argamassa de referência. Em boa verdade, efectuou-se uma comparação qualitativa dos principais resultados dos ensaios, de forma a obter uma visão global do comportamento das argamassas. Nesses quadros a cor verde das células indica um resultado vantajoso (favorável) para aplicação das argamassas na reabilitação de edifícios antigos e para edifícios com paredes de terra. A cor vermelha indica um resultado não vantajoso (que não é favorável), por fim as células com cor branca indicam que apesar de o resultado ser pior que o da argamassa de referência, cumpre os requisitos estabelecidos em estudos anteriores (Veiga, 2010). Os símbolos “✓; ✓✓; ✓✓✓” indicam um grau benefício crescente. Os símbolos “x; xx; xxx” indicam um grau de desvantagem crescente.

Quadro 5.21 - Análise global dos resultados dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura

Argamassas	Caracterização no Estado Endurecido (Prismas) – 1 ano de idade de cura								
	λ [W/m.k]	Ed [MPa]	Rt [Mpa]	Rc [Mpa]	CC [Kg/m ² .m ^{1/2}]	VA [Kg/ m ²]	TS [kg/(m ² .h)]	Is [-]	Δm 20c [%]
CL2	0,74	3172,25	0,38	0,68	3,38	18,35	0,23	0,19	47,53
CL2_10t	✓✓	✓	x	x	✓	✓	x	=	x
CL2_25t	✓	✓✓	xx	xx	✓	✓✓	✓	✓✓	xx
CL2_50t	x	✓✓✓	xxx	xxx	x	✓	✓✓	✓	xxx

Pela análise do quadro 5.21 constata-se que tanto o módulo de elasticidade dinâmico, como as resistências mecânicas (Rt e Rc) diminuem com a introdução de terra. Quanto maior for a quantidade de terra introduzida, menor é o valor das resistências. Contudo, para o módulo de elasticidade dinâmico, este resultado pode ser considerado favorável e, tal como se verificou na secção 5.2.1.4 e 5.2.1.5, os valores de resistências mecânicas das argamassas com terra cumprem os requisitos definidos por Veiga et al. (2010) pelo que estas demonstram ser adequadas para aplicação em rebocos de edifícios antigos ou outros com características mecânicas similares. Relativamente ao comportamento na presença de água, considera-se que globalmente as argamassas com terra são vantajosas, destacando-se, pelo seu desempenho positivo, a argamassa com 25% de terra. O comportamento das argamassas com 10% e 25% de terra é também competitivo devido à sua condutibilidade térmica (λ).

Com a introdução de terra, verifica-se um aumento da perda de massa face à acção dos sulfatos e, consequentemente, uma menor resistência à acção dos sulfatos.

Quadro 5.22 - Análise global dos resultados dos provetes em tijolo com 1 ano de idade de cura

Argamassas	Caracterização no Estado Endurecido (Provetes em Tijolo) – 1 ano de idade de cura				
	DS [Graus Shore A]	λ [W/m.k]	V _{us} [m/s]	CC [Kg/(m ² .mim ^{0.5})]	TS [kg/(m ² .h)]
CL2	69	0,56	1006	0,46	0,15
CL2_10t	xxx	✓✓	x*	✓	✓
CL2_25t	xx	✓	x*	✓✓	✓✓
CL2_50t	x	x	✓	x	✓✓✓

*Apesar de menor valor, a diferença de resultados pode ser considerada pouco significativa

Em relação aos provetes em suporte de tijolo (quadro 5.22) conclui-se que a dureza superficial diminui nas argamassas com terra, mas essa avaliação não é proporcional à percentagem de terra, o que pode indicar inadequação do método e equipamento utilizado. Quanto à condutibilidade térmica e analogamente aos provetes prismáticos, as argamassas com 10% e 25% de terra têm um comportamento favorável quando comparadas com a argamassa de referência. A velocidade de

propagação de ultrassons só é mais vantajosa na argamassa com maior quantidade de terra, embora não tenha grande alteração nas restantes argamassas com terra. Em relação ao comportamento face à água, no geral as argamassas com terra têm um melhor comportamento. Têm uma absorção de água mais lenta (CC menor) e maior taxa de secagem.

Quadro 5.23 - Análise global dos resultados do reboco do murete de taipa com 1 ano de idade de cura

Caracterização no Estado Endurecido (Reboco do Murete de Taipa) - 1 ano de idade de cura						
Argamassas	DS [Graus Shore A]	RS [Graus Vickers]	CC [Kg/(m ² mim ^{0.5})]	VA [kg/ m ²]	TS [kg/(m ² .h)]	IS [-]
CL2	74	32,00	1,55	4,94	0,32	0,46
CL2_25t	✓	✓	✓	x*	✓	✓

*Apesar de menor valor, a diferença de resultados pode ser considerada pouco significativa

No quadro 5.23, observa-se que, globalmente, o comportamento da argamassa com 25% de terra é mais vantajoso do que o comportamento da argamassa de referência. A argamassa com terra absorve maior quantidade de água do que a argamassa CL2 de referência (que é traduzida pelo valor de VA); no entanto, essa diferença não é muito significativa.

Em suma, pode constatar-se que os maiores valores de resistência mecânica são obtidos com a argamassa de referência (CL2). Com efeito, a introdução de terra em substituição do ligante provoca diminuição das resistências mecânicas. Contudo, de acordo com a informação apresentada no estado do conhecimento (secção 2.2.1), a alvenaria de taipa tem um módulo de elasticidade na ordem dos 500-3000 MPa que é significativamente mais baixo do que o betão. Deste modo, são desejáveis rebocos menos rígidos, com módulos de elasticidade mais baixos. Torna-se, assim, vantajosa a aplicação de argamassas com maior deformabilidade, tal como as argamassas mistas de terra.

Com a introdução de terra, obtiveram-se valores de λ mais baixos, sendo este aspecto igualmente benéfico. Também no ensaio do comportamento face à água se obtiveram resultados satisfatórios, principalmente na argamassa com 25% de terra, em oposição à argamassa com 50% de terra, que revela o pior comportamento.

5.4 Comparação de resultados no estado endurecido

No presente subcapítulo, são comparados os diversos parâmetros, pretendendo-se, deste modo, compreender melhor os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados nas argamassas com 1 ano de idade de cura. São analisadas tendências e, sempre que possível, correlacionados parâmetros físicos, mecânicos e químicos.

5.4.1 Propriedades Mecânicas

Seguidamente, irão ser comparados os resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção e resistência à compressão, nas argamassas dos provetes prismáticos (identificados pela letra *P*).

O ensaio de resistência à compressão também foi realizado nas argamassas recolhidas do murete de taipa (identificadas pela letra *M*). Estes resultados encontram-se expostos na figura 5.71.

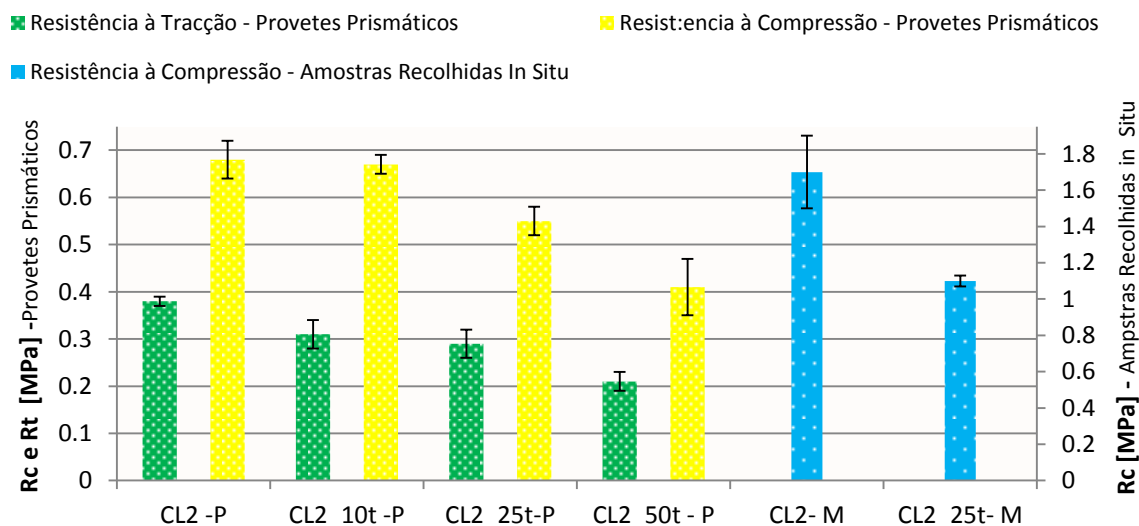


Figura 5.71 - Resistência à compressão, resistência à tracção das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra *P* - identifica os provetes prismáticos e a letra *M* - identifica argamassas recolhidas do murete de taipa).

Pela análise dos valores de resistências mecânicas (resistência à tracção e resistência à compressão) das argamassas dos provetes prismáticos, apresentados na figura 5.71, é possível verificar que em ambos os casos é a argamassa de referência CL2 que tem os valores mais elevados. Em oposição, o valor mais baixo para as duas resistências mecânicas corresponde à argamassa com 50% de terra. Como já mencionado, comparando estas duas grandezas nos provetes prismáticos, verifica-se que ambas têm a mesma tendência, ou seja, a argamassa com maior valor de resistência à compressão tem também o maior valor de resistência à tracção. O mesmo acontece para os menores valores de resistências mecânicas. Com efeito, verifica-se que o aumento da percentagem de terra introduzida nas argamassas de cal aérea provoca uma diminuição das grandezas mecânicas. Quanto maior for a percentagem de terra introduzida, maior será a diminuição das resistências mecânicas em relação à argamassa de referência de cal aérea, CL2.

Globalmente as argamassas dos provetes prismáticos cumprem os requisitos de resistência à tracção e de resistência à compressão para aplicação em rebocos exteriores e em rebocos interiores, de acordo com a gama indicativa de Veiga et al. (2010). Contudo, face a essa gama, nenhuma argamassa se revela adequada ao refechamento de juntas. Verifica-se, ainda, que a tendência de evolução da resistência à compressão dos provetes prismáticos e das argamassas recolhidas *in situ* do reboco do murete de taipa é consistente. De facto a resistência à compressão diminui com a introdução de terra.

Naturalmente não são directamente comparáveis os valores do ensaio, na medida em que se trata de dois procedimentos de ensaios diferentes com provetes diferentes (prismáticos e recolhidos *in situ*), com condições de cura diferentes e também com e sem influência do suporte. Apesar disto, os resultados obtidos com a argamassa recolhida do murete de taipa são bastante satisfatórios.

Como referido anteriormente nesta dissertação (secção 5.2.1.10), as resistências mecânicas estão em conformidade com os resultados mineralógicos obtidos. Em boa verdade, nas argamassas analisadas ocorreu apenas a reacção de carbonação. Como expectável, muito devido ao tipo de minerais argilosos (caulinite) na terra não houve formação de nenhum composto novo que originasse um aumento de resistência.

Numa argamassa, para além das resistências mecânicas, são desejáveis módulos de elasticidade compatíveis com o suporte. Com efeito, e segundo Faria (2004), quanto menor for o módulo de elasticidade e menor o quociente entre o módulo de elasticidade e a resistência à tracção, menor será a propensão da argamassa para fendilhar. É necessário referir igualmente que quanto melhor for a aderência da argamassa ao suporte, melhores serão as distribuições das tensões e, consequentemente, melhor será o comportamento face à fendilhação.

A figura 572 apresenta-se o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e a relação entre o E_d e R_t (resistência à tracção) das argamassas dos provetes prismáticos.

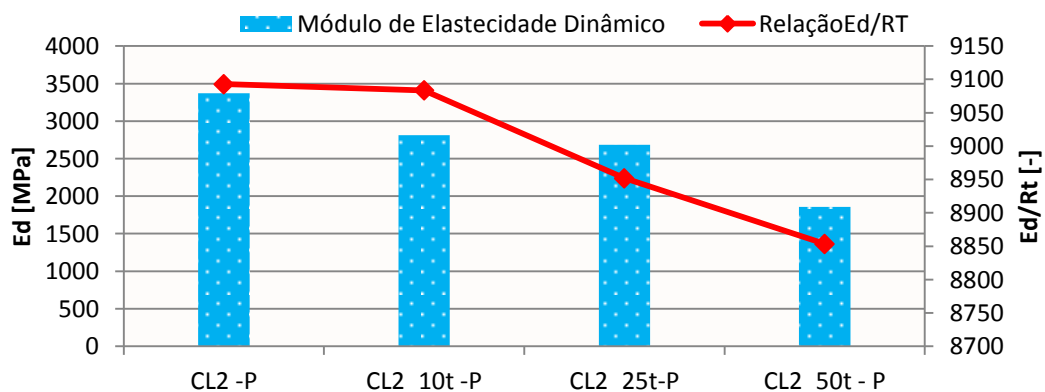


Figura 5.72 - Relação E_d/R_t e módulo de elasticidade dinâmico dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.

Pela análise da figura 5.72 conclui-se que o E_d diminui com a introdução de terra. Com excepção da argamassa com 50% de terra, as argamassas cumprem a gama de valores do módulo de elasticidade proposto por Veiga et al. (2010). No entanto, o valor de E_d da argamassa CL2_50t não se encontra muito afastado da gama proposta por Veiga, que é apenas indicativa e, consequentemente, não invalida a utilização da argamassa. A razão E_d/R_t tem tendência a diminuir com a introdução de terra, indicando também o aumento de deformabilidade.

É ainda interessante comparar os resultados da resistência à compressão com os resultados da resistência aos sulfatos. Na figura 5.73 encontram-se os resultados da resistência à compressão dos provetes prismáticos e a perda de massa registada nos mesmos provetes após o 20º ciclo de acção aos sulfatos.

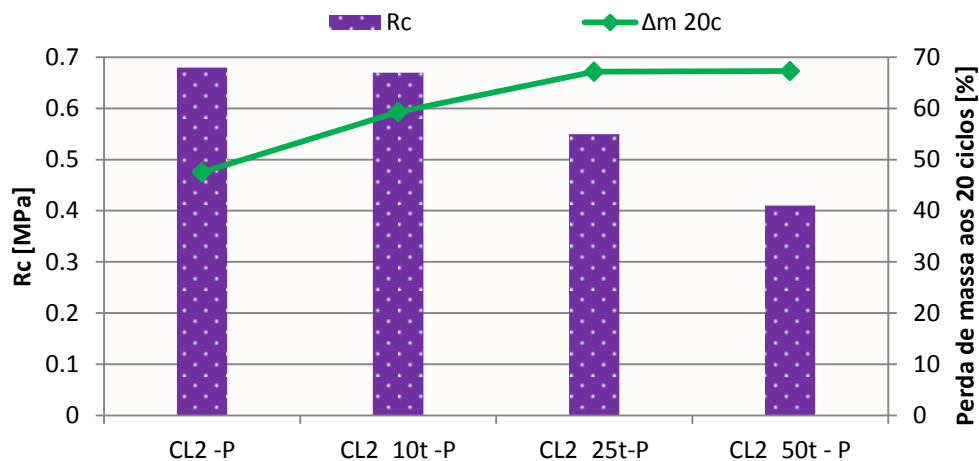


Figura 5.73 - Resistência à compressão e resistência aos sulfatos ao 20º ciclo (provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura).

De acordo com a análise da figura 5.73 a tendência apresentada por ambas as propriedades é coerente. De facto, a tradução da resistência mecânica, nomeadamente resistência à compressão, com o aumento da introdução de terra nas argamassas é também traduzida pelo aumento da perda de massa face à acção dos sulfatos (menor resistência aos sulfatos). Contudo, salienta-se o facto de que, a partir de 25% de terra introduzida, a perda de massa face à acção dos sulfatos manteve-se aproximadamente constante, mostrando ser um resultado bastante benéfico, porque o aumento da percentagem de terra incorporada nas argamassas (a partir dos 25%) não é traduzido por uma diminuição significativa de resistência aos sulfatos.

A argamassa com 25% de terra mostra possuir um comportamento bastante eficiente em relação a estas duas propriedades.

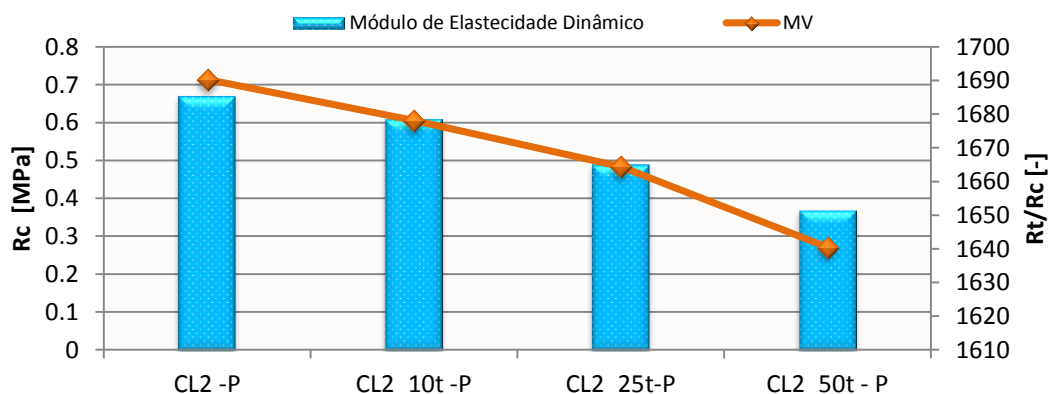


Figura 5.74- Resistência à compressão e massa volúmica (pelo método geométrico) dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.

A figura anterior (figura. 5.74) relaciona a massa volúmica determinada pelo método geométrico com a resistência à compressão das argamassas dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura. Ambas as propriedades têm a mesma tendência, ou seja, a diminuição da resistência mecânica é acompanhada pela diminuição da massa volúmica.

5.4.1 Comportamento face à água

Em relação ao comportamento face à acção da água, é importante conhecer os parâmetros de absorção capilar (tanto em relação à quantidade total de água absorvida, como também em relação à velocidade de absorção da água). Como já referido ao longo da presente dissertação, idealmente, pretende-se que a argamassa absorva pouca quantidade de água, o que é traduzido num baixo valor VA. Ambiciona-se, ainda, que a absorção de água decorra de uma forma lenta (baixo CC). Após a absorção de água pela argamassa, pretende-se que a secagem seja o mais rápida possível, no início do processo (TS elevado), e globalmente apresente uma maior facilidade de secagem (IS baixo). A percolação de água no estado líquido tem sempre efeito prejudicial – quer pela remoção de partículas finas, e consequentemente diminuição da compacidade das zonas afectadas pela água, quer pelos efeitos nefastos dos sais solúveis, como por exemplo os sulfatos (Faria e Henriques, 2005). Por estes motivos é imprescindível que o reboco tenha um bom comportamento face à água, impedindo a percolação da água para o interior das paredes de terra, e/ou funcionando como uma “superfície de sacrifício” face aos agentes de degradação.

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade e secagem das argamassas dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura encontram-se na figura 5.75.

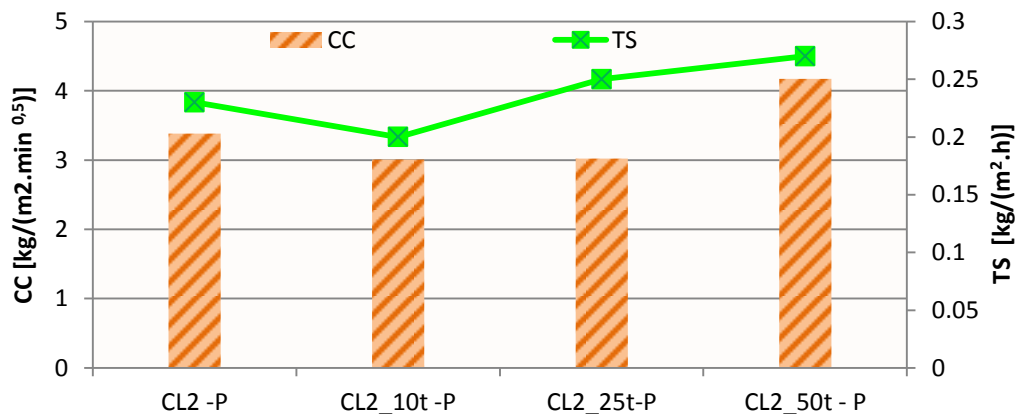


Figura 5.75 - Coeficiente de capilaridade (CC) e taxa de secagem (TS) dos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.

O coeficiente de capilaridade e a taxa de secagem traduzem a velocidade inicial de absorção de água e a secagem inicial, respectivamente. Globalmente, e apesar destas duas propriedades

ocorrerem a velocidades diferentes, apresentam a mesma tendência (figura 5.75). A argamassa que possui maior valor de coeficiente de capilaridade é também a argamassa com maior taxa de secagem. Porém, a argamassa com 25% de terra revelou um bom comportamento face à presença de água (tanto na absorção como na secagem). De facto, CL2_25t é uma das argamassas com menor absorção de água inicial (CC baixo), juntamente com a argamassa com 10% de terra, e apresenta um valor de taxa de secagem igualmente elevado. Naturalmente são evidentes as vantagens da argamassa com 25% de terra em relação à argamassa de referência: menor valor de CC e simultaneamente maior valor de TS.

Os valores obtidos são superiores à gama de valores sugerida por Veiga et al. (2010), devido a diferenças no procedimento de ensaio. Na presente dissertação, os provetes foram envolvidos com uma película aderente de polietileno nas superfícies laterais, enquanto Veiga usou uma resina impermeabilizante para garantir que a impermeabilização ocorre apenas pela base do provete. Em trabalhos ainda não publicados, nomeadamente, em argamassas pré-doseada terra argilosa, areia e fibras vegetais analisada à capilaridade com provetes com diferentes preparações verificou-se o uso de película como impermeabilização implica um aumento do CC, que pode justificar o não cumprimento da gama referida.

Seguidamente confronta-se o valor assintótico com o índice de secagem nos provetes prismáticos com 1 ano de idade (figura 5.76).

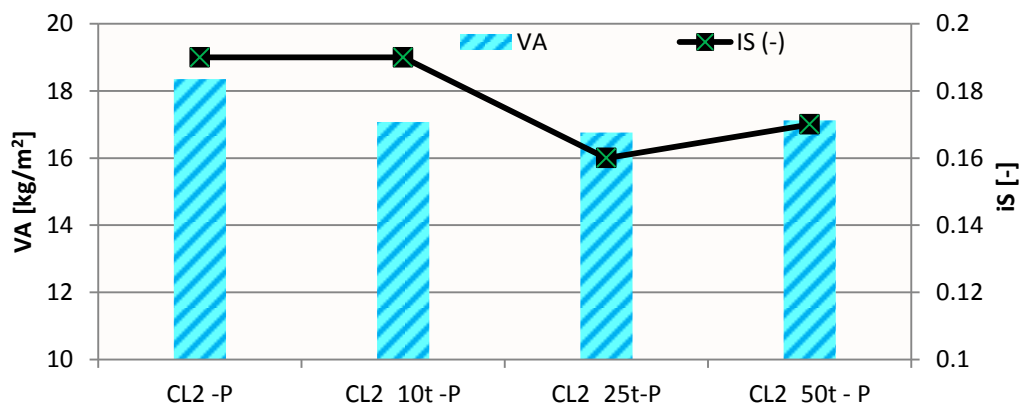


Figura 5.76 - Valor assintótico (VA) e índice de secagem (IS) das argamassas nos provetes prismáticos com 1 ano de idade.

Na figura 5.76 observa-se que entre a argamassa de referência e a argamassa com 10% e 25% de terra existe uma diminuição do VA, que volta a aumentar para a argamassa com 50% de terra (continuando, no entanto, a ser inferior à argamassa de referência). O IS mante-se constante na argamassa de referência e na argamassa com 10% de terra e diminuiu na argamassa com 25% de terra,

voltando a aumentar na argamassa com 50% de terra (mas o valor é inferior ao da argamassa de referência).

Analisando a figura 5.76 verifica-se ainda que a argamassa com 25% de terra possui tanto o menor valor de VA, como o menor valor de IS, demonstrando ser uma argamassa muito competitiva comparativamente com a argamassa CL2, que tem o pior comportamento. De facto, a argamassa sem adição de terra absorve maior quantidade de água (maior VA) e tem maior dificuldade na secagem global.

Em suma e de acordo com as figuras 6.75 e 6.76 a argamassa com 25% de terra apresenta o melhor comportamento tanto na absorção de água por capilaridade como na secagem.

Na figura 5.77, comparam-se as características relativas à absorção capilar (através do VA) com a porosidade aberta nos provetes prismáticos com 1 ano de idade. De facto a porosidade aberta influencia o comportamento das argamassas face à água.

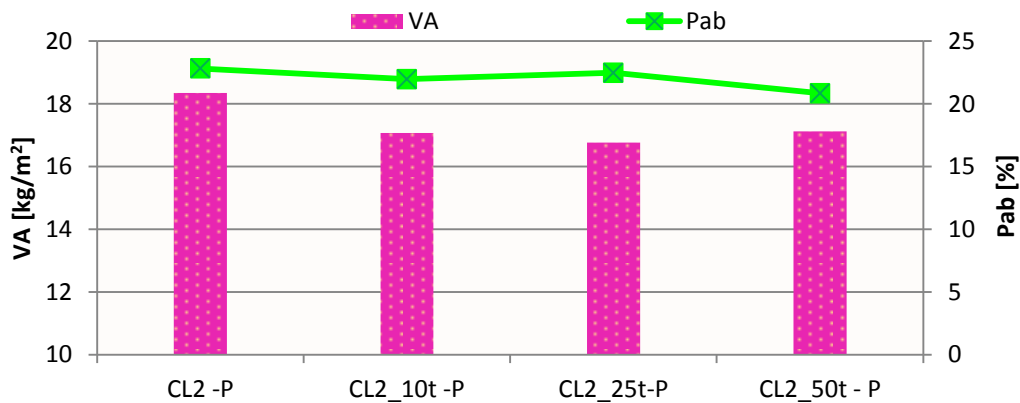


Figura 5.77 - Valor assíntótico e porosidade aberta (pelo método hidrostático) das argamassas nos provetes prismáticos com 1 ano de idade de cura.

De acordo com a figura 5.77 observa-se que não existem variações significativas no valor de porosidade aberta em todas as argamassas. Contudo, a argamassa de referência absorveu maior quantidade de água, em oposição à argamassa com 25%, que obteve o menor valor de VA. Com efeito, é necessário referir que não só a porosidade aberta influencia a absorção de água, mas também o diâmetro dos poros. De acordo com os resultados da porosimetria de mercúrio, a argamassa de referência é a que apresenta maior quantidade de poros com menor diâmetro, justificando, assim, uma maior quantidade de água absorvida. Naturalmente, quanto menor o diâmetro dos poros, maior será a pressão capilar e, consequentemente, maior a ascensão capilar (Rato, 2006).

Seguidamente irão ser comparados os resultados do ensaio de absorção capilar (pelo valor de CC) nas argamassas dos provetes prismáticos (identificados pela letra P), das argamassas aplicadas sobre o suporte de tijolo (identificados pela letra T). Estes resultados encontram-se na figura 5.78.

Posteriormente serão também confrontados os valores de CC das argamassas recolhidas do murete de taipa (identificadas pela letra M).

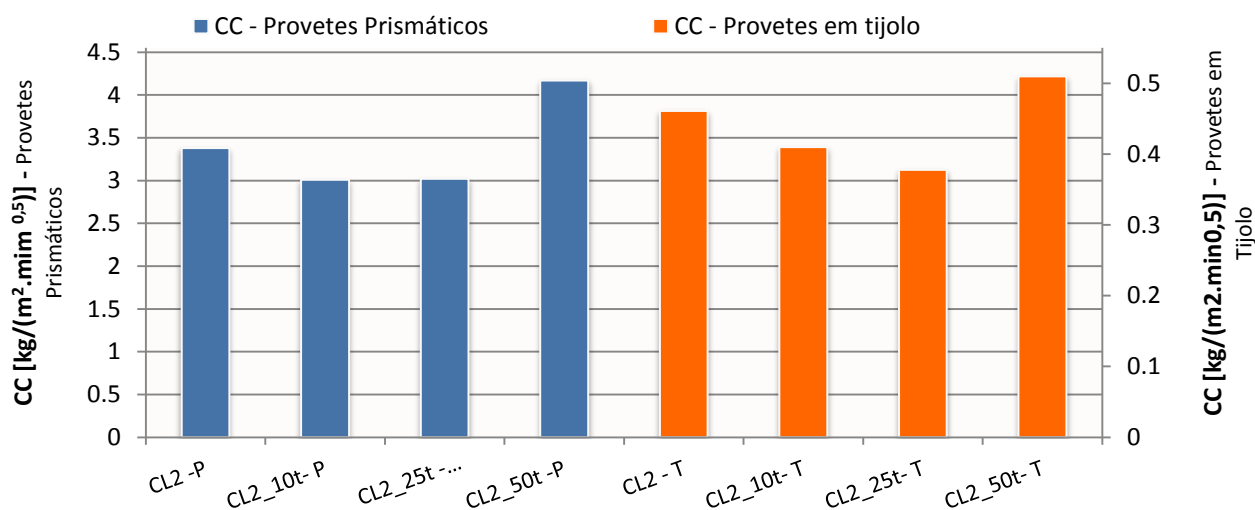


Figura 5.78 - Coeficiente de capilaridade das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra P- identifica os provetes prismáticos e a letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).

Pela análise da figura 5.78 conclui-se que a tendência de evolução do coeficiente de capilaridade dos provetes prismáticos é semelhante à das argamassas aplicadas sobre tijolo cerâmico. Nos prismas os valores de CC diminuem com a introdução de 10% e 25% de terra relativamente à argamassa de referência. No entanto, verifica-se um aumento na argamassa com 50% de terra, atingindo valor superior ao CC da argamassa de referência. A argamassa com 25% de terra tem o comportamento mais favorável nos dois tipos de provetes, uma vez que apresenta uma lenta absorção de água (baixo CC).

É também importante comparar os valores de CC de argamassas aplicadas em diferentes suportes, nomeadamente: tijolo cerâmico e murete de taipa (figura 5.79). Os valores obtidos não são directamente comparáveis, uma vez que se trata de procedimentos diferentes, com argamassas aplicadas em suportes diferentes e com diferentes condições de cura. Contudo, verifica-se a mesma tendência, isto é, a diminuição do CC com adição de terra (da argamassa de referência até argamassa com 50% de terra). Salienta-se ainda o facto de o tijolo, durante o ensaio de absorção capilar, ter revelado possuir um comportamento praticamente estanque comparativamente à quantidade de água absorvida pela argamassa.

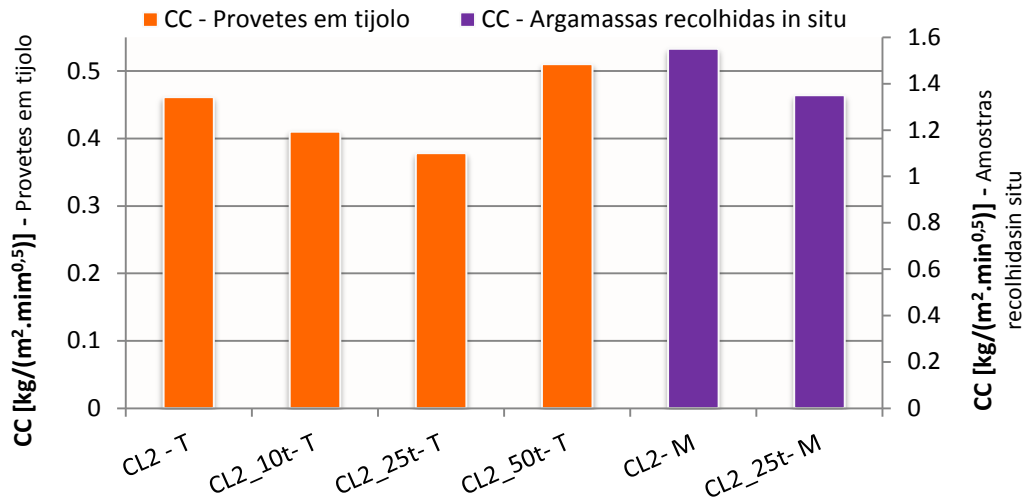


Figura 5.79 - Coeficiente de capilaridade das argamassas com 1 ano de idade de cura aplicadas em dois suportes diferentes (letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo e a letra M- identifica argamassas recolhidas do murete de taipa).

Idealmente ambiciona-se que as argamassas possuam uma rápida secagem, evitando a retenção de água no suporte. As argamassas de cal aérea têm uma secagem muito mais rápida do que argamassas de cimento (Faria, 2004), evitando assim a degradação do suporte. Na figura 5.79 compara-se a taxa de secagem das argamassas com 1 ano de idade de cura em provetes prismáticos e aplicadas sobre o tijolo. Com efeito, verificou-se que a secagem é mais rápida com a introdução de terra, comparativamente com argamassa de referência CL2. No geral, as argamassas em provetes prismáticos e aplicadas sobre tijolo têm a mesma tendência evolutiva. Nos prismas, a argamassa com 10% de terra tem uma secagem ligeiramente menos rápida que a argamassa de cal aérea, contudo, as restantes argamassas com terra têm maior facilidade de secagem do que a argamassa CL2.

O ensaio de secagem demonstrou que, globalmente, as argamassas com introdução de terra são bastante competitivas em relação à argamassa de referência (de cal aérea).

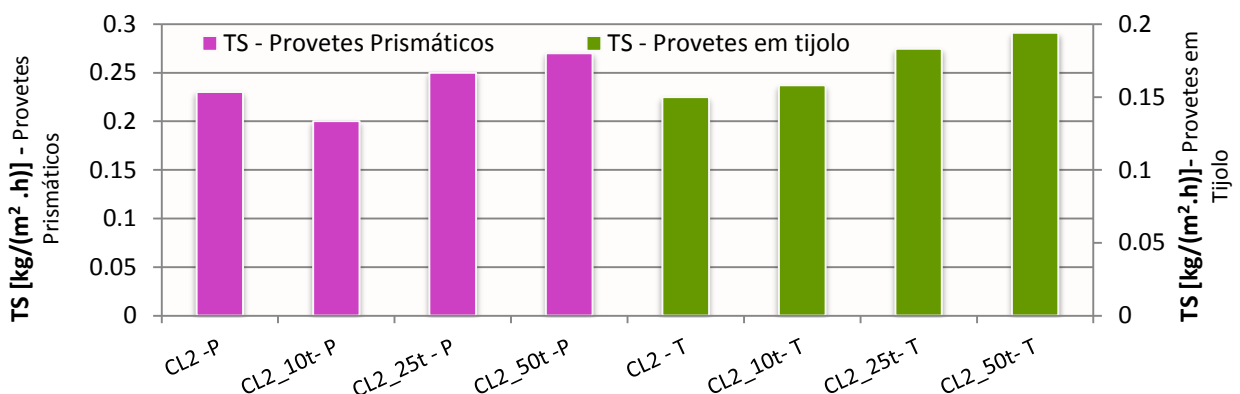


Figura 5.80 - Taxa de secagem das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra P- identifica os provetes prismáticos e a letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).

Pela análise da figura 5.80 verifica-se que globalmente existe um aumento da taxa de secagem com aumento da introdução de terra nas argamassas tanto nos prismas como nas argamassas aplicadas sobre suporte de tijolo.

Na figura 5.81 observam-se os resultados obtidos no ensaio de secagem (através da taxa de secagem) das argamassas aplicadas em dois suportes: tijolo cerâmico e murete de taipa. As argamassas analisadas mostram a mesma tendência, isto é, maior facilidade de secagem com a introdução de terra.

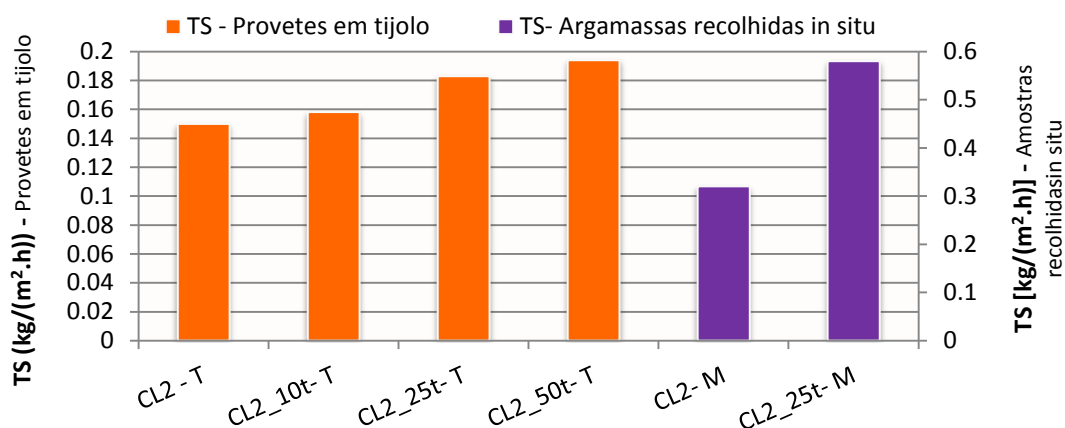


Figura 5.81 - Taxa de secagem das argamassas com 1 ano de idade de cura aplicadas em dois suportes diferentes (letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo e a letra M- identifica argamassas recolhidas do murete de taipa).

5.4.1 Condutibilidade térmica

Actualmente verifica-se uma preocupação acrescida sobre o comportamento térmico dos edifícios. De facto, o conforto térmico e a qualidade do ambiente interior são características importantes, razão pela qual não podem ser descurados. Assim, o reboco também deve contribuir pela positiva para o conforto térmico do ambiente interior. Naturalmente, esta contribuição é limitada, tal como anteriormente referido, devido à reduzida espessura do reboco.

A comparação da condutibilidade térmica obtida nos provetes prismáticos e em suporte de tijolo (com 1 ano de idade) encontra-se na figura 5.82.

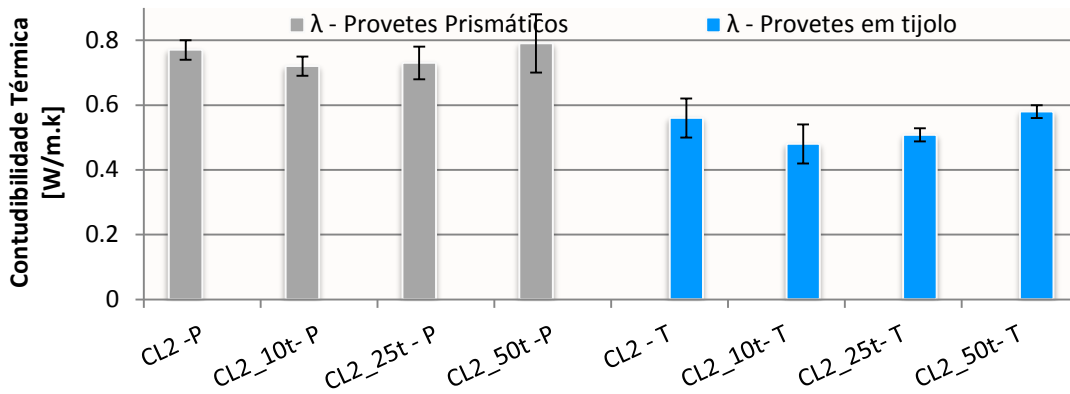


Figura 5.82 - Condutibilidade térmica das argamassas com 1 ano de idade de cura (letra P- identifica os provetes prismáticos e a letra T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).

Analisando a figura 5.82 verifica-se que existe uma tendência de diminuição da condutibilidade térmica com introdução de terra, até 25%. Com 50% de terra, o valor de λ volta a aumentar. A tendência identificada é comum aos dois tipos de provetes. Naturalmente as diferenças nos resultados provêm do tipo de provetes, já que ambos têm a mesma idade e o mesmo tipo de cura. Apesar da largura da sonda utilizada para a realização do ensaio ser superior à largura das faces do provete prismático, consideram-se importantes os resultados obtidos, na medida em que os valores servem como termo de comparação permitindo avaliar a mesma tendência evolutiva. A superfície do reboco aplicado do tijolo é menos lisa do que a superfície do provete prismático. Com efeito, tal facto pode influenciar os resultados obtidos.

A comparação entre a velocidade de ultrassons e a condutibilidade térmica das argamassas aplicadas sobre o suporte de tijolo com 1 ano de idade de cura, encontra-se na figura 6.83. Com a velocidade de propagação de ultrassons é possível identificar a compacidade de um material.

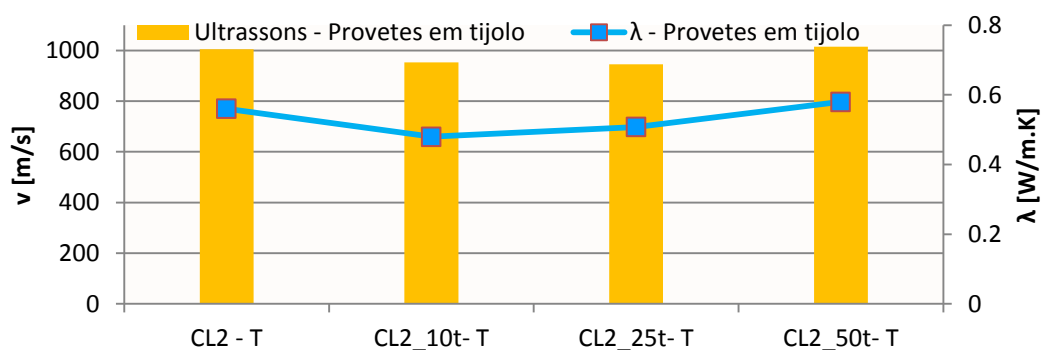


Figura 5.83 - Velocidade de propagação de ultrassons e condutibilidade térmica das argamassas com 1 ano de idade de cura letra (T - identifica argamassas aplicadas sobre tijolo).

Na figura 5.83, observa-se que a tendência seguida pelos ultrassons é a mesma que é seguida pela condutibilidade térmica, isto é, o aumento dos ultrassons é acompanhado pelo aumento da condutibilidade térmica. Os resultados obtidos por estas duas grandezas são coerentes, uma vez que, quanto maior for a velocidade de propagação de ultrassons, maior é a compacidade da argamassa (menor número de vazios) e maior condutibilidade térmica corresponde também a uma maior compacidade. Deste modo, maiores valores de ultrassons estão associados a maiores valores de condutibilidade térmica.

5.4.1 Porosimetria de mercúrio

O ensaio de intrusão de mercúrio foi realizado em diferentes provetes: provetes prismáticos, provetes em tijolo e nas argamassas recolhidas do murete de taipa. Torna-se, assim, interessante avaliar a influência do suporte na dimensão dos poros.

Nas figuras 5.84 e 5.85, comparam-se os resultados da porosimetria da argamassa CL2 (referência) e na argamassa CL2_25t (com 25% de terra) em diferentes suportes.

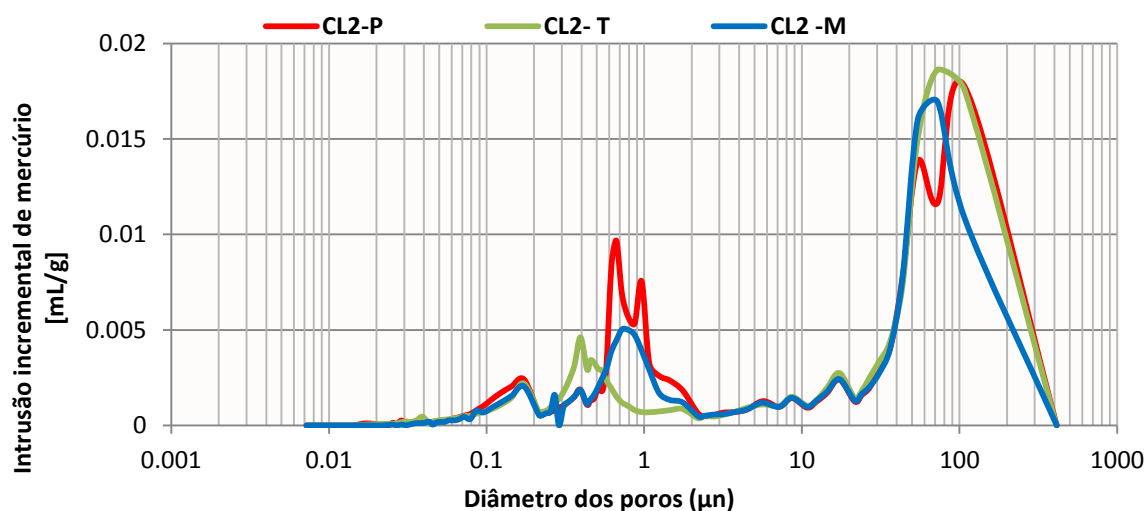


Figura 5.84 - Distribuição do tamanho dos poros (por intrusão de mercúrio) argamassa CL2 com 1 ano de idade (letra P - identifica provete prismático; a letra T - refere-se ao provete em suporte de tijolo e a letra M - identifica as argamassa recolhida do murete de taipa).

Da figura 5.84, observa-se que a distribuição dos poros de maiores dimensões (na ordem dos 72μm de diâmetro) é semelhante no provete em tijolo e na argamassa recolhida do murete; contudo, existe em maior quantidade no reboco do murete. O diâmetro dos poros de maiores dimensões do provete prismático é da ordem dos 100 μm, ou seja, diâmetro superior ao das argamassas aplicadas sobre os suportes (tijolo cerâmico e murete de taipa).

Nos poros de menores dimensões, observa-se uma maior coerência na argamassa do provete prismático.

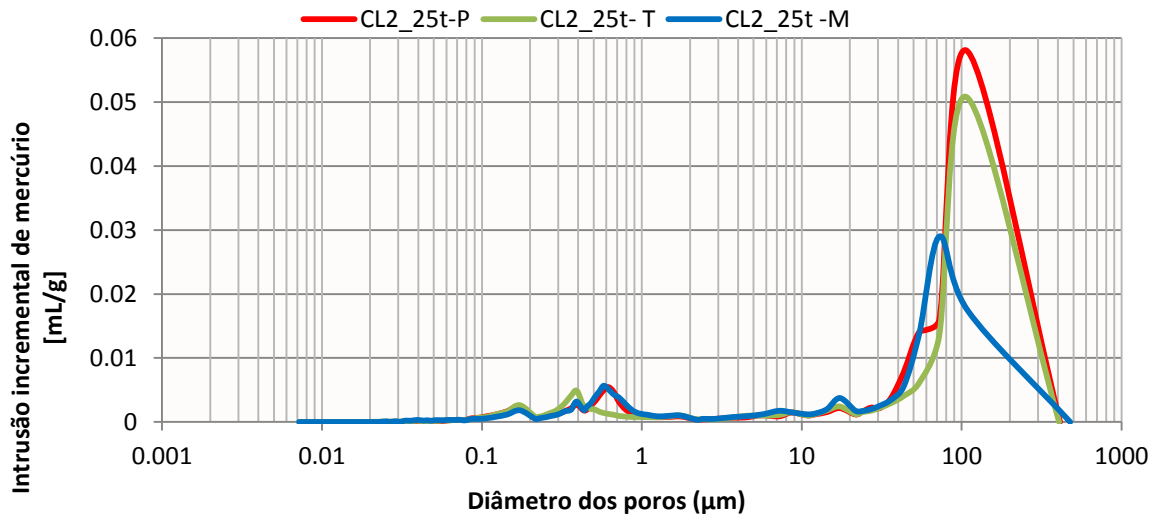


Figura 5.85 - Distribuição do tamanho dos poros (por intrusão de mercúrio) da argamassa CL2_25t com 1 ano de idade (letra P - identifica provete prismático; a letra T - refere-se ao provete em suporte de tijolo e a letra M - identifica as argamassa recolhida do murete de taipa).

Na figura 5.85 constata-se que a argamassa do provete prismático e do provete em tijolo têm os poros de maiores dimensões com o mesmo diâmetro (na ordem dos 100 μm), embora com quantidade muito superior no provete prismático. Na argamassa do murete de taipa, os poros de maiores dimensões têm diâmetro inferior aos restantes (na ordem dos 72 μm). Com os poros de menores dimensões (0.6 μm) existem semelhanças entre argamassa recolhida do murete e dos prismas. Na argamassa do provete em tijolo os poros de menores dimensões têm menor diâmetro (0.4 μm).

Em suma, verifica-se que a aplicação da mesma argamassa em diferentes suportes provoca variações nos resultados obtidos na porosimetria por intrusão de mercúrio, conduzindo a diferentes estruturas porosas.

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações Finais

A conservação do património construído e o impacto ambiental causado pela construção civil são temáticas sobre as quais recai, actualmente, um interesse crescente. Este foi o fio condutor para enquadrar a importância das construções em terra. A presente dissertação iniciou-se dando ênfase à contextualização histórica das construções em terra. Em boa verdade, a terra como material de construção não representa apenas um testemunho do passado, mas deve sim constituir uma importante hipótese no presente e no futuro. Por exemplo, no Alentejo, para além do vasto património edificado vernacular e monumental construído em terra, existe também um elevado número de construções recentes feitas com paredes de terra – não só habitações familiares mas também muitos edifícios relacionados com o turismo. Em Portugal, a terra foi, muitas vezes, misturada com cal para formular argamassas mistas de terra e cal, que eram aplicadas nos rebocos exteriores de construções de terra (nomeadamente em taipa, maioritariamente no Alentejo) e também como argamassas de assentamento de alvenarias de adobe e de pedra (principalmente nas zonas de Aveiro e Norte do país).

Apesar do reconhecimento do património representado por este tipo de construções, foram muitos os erros cometidos nestas construções. De facto, é possível encontrar muitas construções reparadas com argamassas à base de cimento, na tentativa de combater a degradação. Porém, estas argamassas acabam por introduzir problemas adicionais a estes edifícios ou de ampliar os já existentes (caso, por exemplo, de problemas de humidades ascensionais). É, assim, urgente intervir em consciência. Apesar dos esforços apresentados, existe escassa informação sobre argamassas mistas de terra e cal.

É necessário prosseguir na investigação dedicada ao estudo de argamassas com introdução de terra, possibilitando tipificar as características que se podem obter ao introduzir este material na formulação de argamassas de cal.

6.2 Principais Conclusões

A campanha experimental realizada nesta dissertação foi fundamental para avaliar as características das argamassas mistas de cal e terra no estado endurecido. Foi possível avaliar, de forma sistemática, a influência da substituição de cal por percentagens crescentes de terra nas argamassas com traço volumétrico 1:2.

Tornou-se muito interessante analisar o comportamento das argamassas com a evolução da idade de cura (dos 90 dias para 1 ano) com base em três tipos de provetes/aplicações diferentes – prismas de

argamassa, argamassas aplicadas sobre tijolo e sobre murete de taipa. De acordo com a natureza das argamassas formuladas, a aplicação e caracterização do reboco no murete de taipa tornou possível obter resultados mais próximos da realidade relativamente ao comportamento das argamassas face à influência do suporte com natureza semelhante e em condições adversas de exposição natural. Com este estudo foi ainda avaliada a influência da adição de fibras vegetais (em percentagens elevadas) e um pouco da influência de distintos traços (no caso 1:3).

Finalizada a presente dissertação, considera-se que foram cumpridos os objectivos inicialmente traçados de contribuir para um melhor conhecimento de argamassas mistas de cal aérea e terra. Seguidamente, são apresentadas as principais conclusões obtidas relativamente às argamassas com 1 ano de idade de cura e com traço volumétrico 1:2.

Os resultados da DRX mostraram que o mineral de argila maioritário na terra utilizada nas argamassas é a caulinite. Trata-se por isso de uma terra caulinitica. De igual forma, constatou-se que os resultados da análise mineralógica das argamassas são coerentes com as matérias-primas utilizadas. Verifica-se um aumento do pico da caulinite nas argamassas com maior percentagem de terra, em oposição à diminuição da portlandite com a substituição por terra. A caulinite possui uma restrita capacidade de troca de catiões e, em consequência deste facto, tanto aos 90 dias como 180 dias/1 ano não houve formação de novos compostos devido a qualquer reacção entre a cal aérea e a terra caulinitica. Adicionalmente, as condições de cura das argamassas (65% de humidade relativa) poderão também não ter sido as mais aconselháveis para favorecer a reacção pozolânica, a qual exigiria a presença de maior humidade. Verifica-se ainda que a reacção de carbonatação ocorreu até aos 90 dias de idade, uma vez que, o teor de portlandite manteve-se praticamente constante a partir dessa idade. Este facto é muito importante, uma vez que indica que os 90 dias de idade de cura são uma idade bastante representativa para a realização da caracterização química e mineralógica das argamassas.

De acordo com as resistências mecânicas (compressão e tracção) e o módulo de elasticidade dinâmico, verifica-se que os valores obtidos são baixos, globalmente inferiores aos da argamassa só de cal aérea (argamassa de referência). Esta tendência é validada nos provetes prismáticos e nos rebocos do murete de taipa.

Constata-se que houve também uma diminuição das resistências com a evolução da idade de cura, associado a uma diminuição dos teores de calcite nas argamassas, comprovado pelo ensaio de dTG. Este facto desperta curiosidade no sentido de perceber o que se passou nas argamassas que estão temporalmente afastadas relativamente à idade de cura (9 meses). Contudo, com a introdução de fibras vegetais nas argamassas mistas, nas dosagens elevadas que foram utilizadas, não se constatou alterações significativas nas resistências mecânicas ao longo da evolução da idade de cura. Esta situação pode comprovar que a introdução das fibras (alterando a estrutura porosa e a quantidade de pasta num mesmo volume de argamassa) possibilitou uma carbonatação bastante avançada das argamassas logo aos 90 dias de idade.

Apesar dos factos acima mencionados, de acordo com estudos anteriores (Veiga, 2010) os valores obtidos são compatíveis com a utilização das argamassas em rebocos exteriores e interiores, mas não para refechamento de juntas. No entanto, dadas as características mecânicas das paredes de terra, nomeadamente taipa ou alvenaria de adobe, que apresentam grande deformabilidade e baixos valores de resistência à compressão, verifica-se que as argamassas com terra caulinítica são adequadas para este tipo de paredes. Esses factos justificam também a necessidade de escolher argamassas com propriedades semelhantes à alvenaria na qual vai ser aplicada.

A terra quando empregue como material de construção numa argamassa, para além da redução do impacto ambiental e energético, contribui também para a qualidade do ambiente interior. Em boa verdade consta-se uma diminuição da condutibilidade térmica nas argamassas mistas de cal e terra, tanto nos provetes prismáticos como nos provetes de argamassa aplicada sobre o tijolo. Globalmente, as argamassas em estudo com 10% e 25% de terra caulinítica são as que apresentam vantagens, com valores de λ inferiores à argamassa de cal, muito embora esta vantagem seja reduzida face à espessura de aplicação de rebocos.

O comportamento das argamassas relativamente à água tem uma influência directa nos mecanismos de degradação das alvenarias. Os fenómenos de humidade são considerados um dos maiores perigos que pode afectar as construções em terra. A absorção de água pelas argamassas e a sua capacidade de promover uma rápida expulsão da água por evaporação são uma das mais importantes características. Os ensaios laboratoriais de absorção de água por capilaridade e secagem realizados revelam que as argamassas mistas com terra são bastante favoráveis, com especial ênfase para a argamassa com 25% de terra caulinítica. Esta argamassa tem o menor valor assintótico e um dos menores coeficientes de absorção. As argamassas com 25% e 50% de terra caulinítica beneficiam de uma rápida secagem, sendo este um resultado muito satisfatório. Pela comparação dos resultados obtidos nos três tipos de provetes (primas, argamassas aplicadas sobre tijolo e sobre o murete de taipa) a tendência identificada foi consensual, ou seja, os resultados obtidos são claramente vantajosos relativamente à argamassa de cal com terra caulinítica. A introdução de fibras vegetais nas argamassas, nas dosagens elevadas que foram utilizadas, promove absorção de maior quantidade de água e, simultaneamente, torna a secagem um processo mais lento. Globalmente, o comportamento das argamassas em relação à absorção de água por capilaridade e à secagem, melhorou significativamente com a evolução da idade de cura. Contudo, o ensaio de resistência aos sulfatos revelou que a introdução de terra conduz a uma diminuição de resistência.

É importante conhecer a estrutura porosa das argamassas. De acordo com os resultados experimentais da porosimetria de mercúrio, é possível concluir que nos primas, com evolução da idade, existe uma diminuição da quantidade de poros com menor diâmetro e um aumento da quantidade de poros de maiores dimensões nas argamassas com maior quantidade de terra. Genericamente, nas argamassas aplicadas nos suportes (alvenaria de tijolo e murete de taipa) verifica-se a mesma tendência. O aumento da quantidade de terra caulinítica introduzida nas argamassas

conduz, por um lado, ao aumento da quantidade de poros de maior diâmetro e, por outro, à diminuição do número de poros com menor diâmetro.

Os resultados anteriores contribuem para melhor compreensão do comportamento das argamassas mistas de cal e terra caulinítica, perante a presença de água. O aumento da quantidade de poros com maiores dimensões está estreitamente relacionado com absorção de maior quantidade de água no ensaio com os tubos de Karsten e maior facilidade de secagem. Por outro lado, a diminuição da quantidade de poros com menor diâmetro (poros capilares) conduz a menores valores de CC (coeficiente de capilaridade) nas argamassas mistas comparativamente à argamassa de cal.

Foi muito importante a realização dos ensaios no reboco do murete de taipa pois aproxima o presente estudo da realidade e do comportamento efectivo das argamassas aquando da sua aplicação em taipa.

Em suma, tendo em conta todos os resultados obtidos, conclui-se que a argamassa com 25% de terra caulinítica mostrou ser bastante competitiva em relação à argamassa de referência, revelando vantagens acima enumeradas. As características específicas destas argamassas mistas (boa deformabilidade, baixa resistência, boa dureza superficial e um bom comportamento face à água) classificam-nas como adequadas para revestimentos de construções em terra e também de edifícios antigos com características mecânicas semelhantes. Considera-se, assim, que as argamassas mistas de cal aérea e terra poderão ser eficientes na reabilitação de edifícios antigos, sobretudo em edifícios com paredes onde a terra já tinha sido utilizada para a sua execução. A utilização destas argamassas mistas em construção nova com alvenaria de terra será também, certamente, uma solução eficiente nomeadamente ao nível da execução dos rebocos exteriores.

Para além das vantagens efectivas apresentadas ao longo das conclusões, as argamassas mistas de cal e terra possuem menor energia incorporada do que argamassas só de cal aérea, que, já de si, são mais sustentáveis que muitas outras argamassas produzidas a partir de ligantes produzidos a temperaturas superiores, tal como o cimento. Com efeito, a terra pode ser obtida localmente, necessitando de um destorroamento e naturalmente de uma caracterização mineralógica, de modo a conhecer a sua composição. Estes factos espelham as vantagens económicas e ambientais da utilização da terra como material e construção.

Com base na parte inicial da presente dissertação, foi realizado um poster para a Conferência Internacional de Arquitectura Vernacular – CIAV 2013, intitulado “Characterization of Air Lime-Earth Blended Mortars” (vide Anexo). Foi também realizado e apresentado publicamente o artigo “Caracterização de argamassas de cal aérea e terra”, no I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento em Coimbra. Este artigo está incluído no CD, editado com as Atas do Congresso (vide Anexo). Pretende-se ainda disseminar os resultados complementares obtidos neste trabalho através de futuras publicações.

6.3 Propostas de desenvolvimento futuro

De acordo com os resultados obtidos e o trabalho desenvolvido na presente dissertação, propõem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Formulação e estudo de argamassas de terra com origens diferentes de modo a ser possível estabelecer padrões de comparação e de desempenho.

- Formulação e estudo de argamassas com o mesmo traço volumétrico (1:2), mas com introdução de outros tipos de terra, nomeadamente montmoriloníticas e ilítica, nas mesmas percentagens de terra - 10 %, 25% e 50%. Era interessante sujeitar este tipo de argamassas a duas curas: *standard* e cura com maior humidade relativa ($HR \geq 95$ %). Incentiva-se também a análise da difracção de raios- X e análise termogravimétrica permitindo a avaliação da reacção de carbonatação e os constituintes presentes nas argamassas com a evolução da idade de cura.

- Utilização de adições, como a cinza de casca de arroz para propiciar a reacção pozolânica.

- Realização do ensaio de capilaridade em suporte de tijolo mas impermeabilizando lateralmente as faces do tijolo com argamassa. Tanto o ensaio de capilaridade como o ensaio de secagem deverão ser realizado durante um maior número de horas para avaliar a quantidade máxima de água absorvida e tempo necessário para a secagem global. Com estes procedimentos, pretende-se otimizar o ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adam, J. P. (1989) - La construction romaine, matériaux et techniques, 2ª edição, Grand Manual Picard, Paris.

Alexandra, S. (2006) – “Architecture and earth construction in Piauí: Research, Characterization and Analysis”; Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Piauí, Brasil.

Almeida, I.B. (1991) – “Características Geotécnicas dos Solos de Lisboa”; Dissertação de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa.

Alvarez, J.; Sequeira, C.; Costa, M. (2005) - Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa

ASTM Standards (2000) – Standard test method for rubber property – durometer hardness. United States. ASTM D2240-00.

ASTM Standards (2008) – Standard test method for rebound hammer of hardened concrete. United States. ASTM C805-08.

Balderrama, A. (2001) - The Conservation of Earthen Architectures, The Getty Conservation Institute Newsletter, 16, pp 4-10.

Bentur, A. (2002) - Cementitious materials – nine millennia and a new century: past, present and future. Journal of Materials in Civil Engineering, volume 14, págs. 2-22.

Bergaya, F.; Theng, B.K.B; Lagaly, G. (2006) - Handbook of Clay Science, Elsevier, 1.

Boardman, D.; Glendinning, S.; Rogers, C.. (2001) - Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. Géotechnique, 51, pp. 533-543.

Brito, J.; Pereira, A. S.; Correia, J. R. (2005) - Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates, Cement and Concrete Composites, 27, pp. 429-433

Brito, V.; Gonçalves, T.; Faria, P. (2011) – Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport. Journal of Coatings Technology and Research 8, (4), pp. 513-525.

Bruno, P.; Faria, P.; Candeias, A.; Mirão, J. (2010) - Earth mortars use on pre-historic habitat structures in south Portugal. Case studies; J. Iberian Archaeology, 13, pp. 51-67.

Cancino, C. (2008) - Recording and Documentation of Earthen Architecture. Em: Avrami, E.; Guillaud, H.; Hardy, M., editores. Terra literature review—an overview of research in earthen architecture conservation. Los Angeles, Estados Unidos. The Getty Conservation Institute, pp. 32–44.

Carneiro, J. (2012) - “Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino”; Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção; Universidade Nova de Lisboa.

CEN (1999) – EN 1015-3:1999 – Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels.

CEN (1999/2006) – EN 1015-11:1999/A1:2006 - Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels, CEN.

CEN (1999a) – EN 1015-11: 1999 – Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.

CEN (2002) – EN 1015-18:2002 – Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.

CEN (2009) – EN 15801 – Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.

CEN (Comité Européen De Normalisation) (1998) – EN 1015-2: 1998 – Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels.

Cizer, O.; Van-Balen, K.; Van -Gemert, D; Elsen, J. (2009) - Hardening of mortars made from cement, rice husk ash and lime. In Proceedings of the ICE (Institution of Civil Engineers) – Construction Materials, 126, pp. 19-27.

Cristelo, N. (2001) – “Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.

Cruz, T.; Santos-Silva, A. (2006) – Caracterização de argamassas da Igreja de Nossa Sr.^a da Assunção (Elvas) e do castelo da Amieira do Tejo (Nisa). Relatório LNEC 215/06-NMM.

Cultrone, G.; Sebastián, E.; Ortega Huertas, M. (2005) - Forced and natural carbonation of lime- based mortars with and without additives: mineralogical and textural changes, Cement and Concrete Research, 35, pp. 2278 – 2289.

Dias, C. (1999) – Física do Estado Sólido 1998/99. Departamento de Ciências dos Materiais, FCT-UNL.

Dias, I. (2013) – “Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra. A influência da terra como agregado parcial”; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.

Elert, K.; Rodrigues-Navarro, C.; Pardo, E.; Hansesn,E.; Cazalla, O. (2002) - Lime mortars for the conservation of historic buildings. Studies in Conservation, 47, págs. 62-75.

Faria-Rodrigues, P. (2004) – “Argamassas de revestimento para alvenarias antigas – contributo para o estudo da influência dos ligantes”; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, FCT-UNL.

Faria-Rodrigues, P; Henriques, F. (2004) - Current Mortars in Conservation: An Overwiev. International Journal for Restoration, 10, pp. 602-622.

Faria, P.; Henriques, F. (2005) - Condicionantes da Conservação de Construções em Terra. Terra em Seminário – IV Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra - III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 1ª edição. Monsaraz, Portugal. Argumentum, pp. 121-124.

Faria, P; Henriques, F. ; Rato, V. (2008) - Comparative evaluation of aerial lime mortars for architectural conservation. Cultural Heritage, Elsevier, 9, pp. 338-346.

Faria-Rodrigues, P. (2009) - Resistance to salts of lime and pozzolan mortars. RILEM Proceedings pro 067: International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry, pp.99-110. C.Groot (ed).

Faria, P. (2011) – METACAL. Procedimentos experimentais no âmbito do projeto. Caparica, FCT/UNL

Faria, P.; Martins, A. (2011) – Influence of cure conditions on lime and lime-metakaolin mortars. In Proceedings of the XII DBMC. 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components (A+), 2, P Freitas, H. Corvacho, M. Lacasse (eds.), Porto, FEUP, pp. 713-720.

Faria, P.; Silva, V.; Jamú, N.; Dias, I.; Gomes, I. (2013) - Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders, Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development, pp. 407-413.

Faria, P.; Dias, I.; Jamú, N.; Silva, V. (2014) - Air lime-earth blended mortars - Assessment on fresh state and workability, in International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture, Valencia, Versus 2014 (aceite para publicação).

Fernandes, M. (2012) - Interventions in Portuguese rammed earth architecture - from ignorance to good practices, Rammed Earth Conservation, Mileto, Vegas & Cristini (eds.), Taylor & Francis Group, London, , pp. 309-314.

Gameiro, A.; Santos-Silva, A.; Faria, P.; Grilo, J.; Branco, T.; Veiga, R.; Velosa, A. (2014) - Physical and chemical assessment of air lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio. Cement and Concrete Composites, 45, pp. 264-271.

Getty Conservation Institute's Earthen Architecture Conservation (s.d.). Guidelines for the teaching of earthen conservation. [getty.edu/conservation](http://www.getty.edu/conservation). Consultado a 03-01-2014 de:

http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/teaching/ea_teaching_guidelines.pdf

Gillot, J.E (1987) - Clay in Engineering Geology. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Gomes, C.F. (1986) - As argilas. O que são e para que servem. Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, pp 22-25

Gomes, M.I.; Diaz Gonçalves, T.; Faria, P. (2012a) - Earth-based repair mortars: experimental analysis with different binders and natural fibers. Rammed Earth Conservation, Mileto, Vegas & Cristini (eds.), Taylor & Francis Group, London, pp. 661-668.

Gomes, M. I.; Diaz Gonçalves, T.; Faria, P. (2012b) - Evaluación de la influencia del contenido de agua en la trabajabilidad del mortero de tierra. Apuntes – Journal of Cultural Heritage Studies, 25, pp. 258-277.

Gomes, M. I.; Gonçalves, T. D.; Faria, P. (2012c) - Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais; 4º Congresso Português de Argamassas e ERICS, Universidade de Coimbra (CD).

Gomes, I. (2013) – “Conservação de construções em taipa: argamassas de reparação”; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, FCT-UNL.

Gomes, I.; Gonçalves, T.D.; Faria, P. (2014) - Unstabilised rammed earth: characterization of material collected from old constructions in South Portugal and comparison to normative requirements. Int J. Architectural Heritage, 8, pp.185-212.

Goodhew, S.; Griffiths, R. (2005) - Sustainable earth walls to meet the buildings regulations. Energy Build, 37, pp. 451-459

Grilo, J. (2013) – “Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL 3,5 de fabrico nacional” ;Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Grilo, J.; Santos-Silva, A.; Faria, P.; Gameiro, A.; Veiga, R.; Velosa, A. (2014) – Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, volume 51, págs. 287-294.

Guelberth, C.R.; Chiras, D. (2008) - The natural plaster book, earth, lime and gypsum renders for natural homes. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers.

Hall, M; Djerbit, Y. (2004) - Rammed Earth sample production: Context Recommendations and consistency, *Construction and Building Materials*, 18, pp. 281-286.

Hamard, E.; Morel, J.; Salgado, F.; Marcom, A.; Meunier, N. (2013) - A Procedure to Assess the Suitability of Plaster to Protect Vernacular Earthen Architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 14, pp. 109-115.

Hansen, E.; Van Balen, K.; Rodriguez-Navarro, C.(2005) -*Variations in high-calcium lime putty and mortar properties resulting from the use of freshly-slaked quicklime and commercial dry hydrate lime*. In *Proceedings of International Building Lime Symposium*, Orlando, Flórida, 9-11 de Março de 2005.

Henriques, F. (2003) - The concept of acceptable technology in architectural conservation. ITAM-ARCCHIP-ARIADNE workshop 12, República Checa.

Henriques, F. (2011) - Comportamento higrotérmico de edifícios; FCT-UNL.

Henriques, F.; Faria, P. (2006) – Argamassas de substituição na conservação do património. *Construção Magazine*, volume 16, pp. 38-45.

Houben H, Doat P, Fontaine L, Anger R, Aedo W, Olagnon C, et al. (2008) - Builders grains – a new pedagogical tool for earth architecture education. In: 5th International conference on building with earth – LEHM 2008, Weimar, Germany, pp. 7-51.

Instituto Português da Qualidade (IPQ) (2000) – NP EN 1097-3:2000 – Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 3: Método para determinação da massa volumica e dos vazios. Caparica.

IPQ (2000a) – NP EN 933-1:2000 – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Método de Peneiração. Caparica.

IPQ (2007) – NP EN 14146:2006 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Caparica

IPQ (2008) – NP EN 1936:2008 – Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volumicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Caparica.

IPQ (2011) – NP EN 459-1: 2011 – Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. Caparica.

Jamú, N. (2013) – “Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra. A influência da terra como ligante”; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Construção, Universidade Nova de Lisboa.

Jaquin, P. (2008) – “Analysis of Historic Rammed Earth”; Tese de Doutoramento – Universidade de Durham, Reino Unido.

Keable J. (1996) - Rammed earth structures. A code of practice. London,UK: Intermediate Technology.

- Lanas, J.; Alvarez, J. (2003) - Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behaviour. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 33, pp. 1867–1876.
- Lanas, J.; Pérez-Bernal, J.; Bello, M.; Alvarez, J. (2004) - Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 2191-2201.
- Lawrence, R.; Mays, T.; Rigby, S.; Walker, P., D'ayala, D. (2006) – Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 1059-1069.
- Lima, J. (2013) - O Contributo das Argamassas de Barro para a Qualidade do Ambiente Interior de Edifícios: o Caso das Argilas do Sotavento Algarvio. Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, Lisboa.
- LNEC (1962) - Especificação LNEC 1- Vocabulário de estradas e aeródromos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- LNEC (2002) – Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão. Lisboa. FE Pa 39.
- LNEC (2005) – Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Absorção de água por capilaridade para amostras irregulares e friáveis. Lisboa. FE Pa 40.
- LNEC (2009) – Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de resistência à compressão para amostras irregulares. Lisboa. FE Pa 4.
- LNEC (2010) – Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons. Lisboa. FE Pa 43.
- Maniatidis, V.; Walker, P. (2003) - A review of rammed earth construction. Universidade de Bath, Reino Unido.
- Marchetto, G. (2005) - Análises Térmicas – Caracterização de Materiais III. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Santa Catarina, Brasil.
- Margalha, G. (1997) – “O uso da cal nas argamassas no Alentejo”; Dissertação de mestrado em Recuperação do Património Arquitectónico e Paisagístico, Universidade de Évora.
- Margalha, G. (2010) – “Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o fator tempo na sua qualidade” ;Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Margalha, G. (2011) – Argamassas. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património, Universidade de Évora.
- Massena, R. (2011) – “Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural”; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.
- Matias, G.; Torres, I. ; Faria, P. (2014) - Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica. Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio, pp. 1480-1487.
- Melo, K; Carneiro, A. (2010) - Effect of metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 1529-1535.

Michel, P.; Poudru, F. (1987) - Le patrimoine construit en terre en France – Colóquio Internacional sobre o Património Europeu Construído em Terra e a sua Reabilitação, ENTPE.

Minke, G. (2006) - Building with earth, design and technology of a sustainable architecture. Basel-Berlin-Boston: Birkhäuser – Publishers for Architecture.

Miranda, L. F. R.; Selmo, S. M. S. (2003) - Influência de propriedades mecânicas das argamassas na fissuração de revestimentos com RCD”, V Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas (SBTA), São Paulo, Brasil, pp. 559-569.

Mosquera, M.; Silva, B.; Prieto, B; Ruiz-Herrera, E. (2006) - Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapour transport. Cement and Concrete Research, 36, pp 1635–1642.

Murray, H. (2006) - Applied Clay Mineralogy — Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays. Developments in Clay Science, 2, pp. 7-31.

Neves, J.M.C (1993) – “A Estabilização de Solos com Cal. Estudo e Aplicações Rodoviárias”; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Nova de Lisboa.

Oliveira, R.; Brito, J.; Veiga, R. (2013) - Incorporação de agregados finos de vidro em argamassas, Teoria e Prática na Engenharia Civil, 21, pp.25-39.

Pacheco-Torgal, F.; Jalali, S. (2012) - Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction. Construction and Building Materials, 20, pp. 512-519.

Ramachandran, V.; Parolli, R.;Beaudoin, J.; Delgado, A. (2002)- Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. Otava, William Andrew Publishing/Noyes.

Rao, S.M.; Shivananda, P. (2005) - Role of curing temperature in progresso of lime-soil reactions. Geotech. Geolog. Eng., 23, pp. 79-85.

Rato, V. (2006) – “Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas”; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, FCT-UNL.

Rhodes,G. (2006) - Crystallography made crystal clear - A guide for users of macromolecular models, 3ª ed., Academic Press.

RILEM (1980) – Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.ºII.4. Recommandations provisoires. Paris.

RILEM (1980a) – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve. Materials & Structures, 13, 204-207.

Rodriguez-Navarro, C.; Hansen, E.; Ginell I, W. (1998) - Calcium hydroxide crystal evolution upon ageing of lime putty. Journal of American Ceramic Society 81, pp.3032-3034.

Röhlen, Ulrich; Ziegert, Christof (2011) - Earth Building Practice – Planning, Design, Building. 1ª edição. Berlim, Bauwerk Beuth, pp. 7-90.

Santos, P. (2014) – “Caracterização de argamassas de cal aérea e terra: A influência do traço e tipo de fibra natural”; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa.

Santos-Silva, A. (2005) – “Degradação do betão por reações álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua Prevenção”; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidades do Minho.

Schroeder H.; Röhlen U.; Jorchel S. (2008) - Education and vocational training in building with earth in Germany - 5th International conference on building with earth – LEHM 2008, Weimar, Germany.

Shittu, T. (2008) - Earth construction in Nigeria: challenges and prospects - 5th International conference on building with earth – LEHM 2008, Weimar, Germany.

Sousa-Coutinho, A. (2012) - Fabrico e propriedades do betão – Volume I, 5ª edição (reprodução integral da 2ª edição, 1988), Lisboa, LNEC.

Stum, W. (1997) - Reactivity at the mineral-water interface: dissolution and inhibition. *Colloid. Surface A*, 120, pp. 143-166.

Thomson, M.; Lindqvist, J.; Esen, J.; Groot, C. (2005) – Porosity of mortars. In: Final Report of RILEM TC 167-COM, Characterization of Old Mortars with Respect to their Repair, pp. 39-56.

Torraca, G. (1988) - Porous materials building - Materials science for architectural conservation, 3ª ed., Roma.

Torres, C. (2005) – Arquitectura de Terra em Portugal, Introdução. A Memória da Terra, Argumentum, pp. 12-14.

Varum, H.; Velosa, A.; Martins, T.; Pereira, H.; Almeida, J. (2005) – Caracterização mecânica e patológica das construções em Adobe no distrito de Aveiro como suporte em intervenções de reabilitação. Education and Culture Program: Culture 2000, Le case e le città della terra cruda conservazione, significato e decoro urbano, Pannel 2: Análise e patologias.

Veiga, M. R. (1998) – “Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação”; Dissertação elaborada no LNEC para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Veiga, M. R. (2003) - As argamassas na conservação. Atas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Coleção Comunicações, LNEC, Lisboa.

Veiga, M. R.; Fragata, A.; Velosa, A. L.; Magalhães, A. C.; Margalha, G. (2010) - Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings, *International Journal of Architectural Heritage*, 4, pp. 177–195.

Veiga, R. (2007) – Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. In Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos, coleção: Cursos e Seminários, LNEC, Lisboa, pp. 21-34.

Velosa, A.; Veiga, R. (2007) – Argamassas de conservação para edifícios em adobe. Terra em Seminário –V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 1ª edição. Monsaraz, Portugal. Argumentum, pp. 142-144.

Walker, P., Keable, R., Martin, J.; Maniatidis, V. (2005) - Rammed earth: design and construction guidelines, Watford: BRE Bookshop. ISBN 1 86081 734 3, pp.146.

Wargocki, P.; Wyon D.; Baik Y.; Clausen G.; Fanger P. (1999) - Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Pollution Loads. *Indoor Air*, 9, pp. 165-179.

ANEXO

DISSEMINAÇÃO PRELIMINAR DE RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E TERRA

Patrícia Pimenta^{1*}, Paulina Faria², António Santos Silva³ e Naila Jamú⁴

1: Dep. Eng. Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, pc.pimenta@campus.fct.unl.pt

2: UNIC, Dep. Eng. Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, paulina.faria@fct.unl.pt

3: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, ssilvanec.pt

4: Dep. Eng. Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, nailaspj@gmail.com

Palavras-chave: Cal aérea, Terra argilosa, Ligante, Argamassa, Caracterização

Resumo. *A terra é um dos materiais de construção mais antigos e os vestígios arqueológicos mostram o seu uso desde as primeiras sociedades agrícolas. Trata-se de um recurso natural abundante na natureza, ou seja, um material acessível, económico e ecológico.*

Em Portugal a terra foi muitas vezes misturada com cal aérea para formular argamassas de terra e cal. Este tipo de argamassas era aplicado no revestimento e no assentamento de construções de terra, nomeadamente em paredes de taipa, alvenaria de adobe e em paredes de tabique, mas também de alvenarias de pedra.

As argamassas de cal aérea encontram-se bem caracterizadas a nível físico-mecânico e a nível químico e mineralógico. No entanto, esta caracterização não existe para argamassas mistas de cal aérea e terra argilosa. Apesar de, hoje em dia, constatar-se um crescente interesse sobre argamassas com terra, é notória a lacuna de conhecimento que existe nesta aérea. É neste contexto que se enfatiza a necessidade de caracterização deste tipo de argamassas. É evidente que, para tornar novamente a terra um material de construção, em especial para a sua utilização em argamassas compatíveis, é necessário conhecer e caracterizar estas argamassas.

Na presente comunicação caracterizam-se argamassas de cal aérea e terra argilosa aos 90 dias de idade. Partindo de uma argamassa de referência com um traço volumétrico de 1:2 (ligante: agregado), procedeu-se à substituição parcial de massa do ligante por uma terra argilosa, nas proporções de 10%, 25% e 50%. Efectua-se uma caracterização mecânica mas também mineralógica. Apresentam-se e discutem-se os resultados da análise das argamassas mistas face à argamassa de referência, tendo como desafio definir as proporções óptimas entre a argila e a cal aérea, de forma a obter um comportamento cumulativo eficiente das argamassas.

1. INTRODUÇÃO

A conservação do património e o impacto ambiental causado pela construção civil são temáticas sobre as quais recai actualmente um interesse crescente. De facto existem cada vez mais esforços para a escolha de materiais de conservação. A terra é um dos materiais de construção mais antigos e vestígios arqueológicos mostram o seu uso desde as primeiras sociedades agrícolas [1].

Em Portugal existe um património rico e de excelência de construções em terra. No Alentejo é possível encontrar muitas edificações em terra compactada (nomeadamente em taipa). O castelo de Alcácer do Sal é um dos exemplos de construções em terra em Portugal [2]. As construções em terra correspondem a 10% do património mundial da UNESCO [3]. Mas a periodicidade de manutenção deste tipo de construções é variável e está estreitamente dependente do tipo de protecção aos agentes atmosféricos que as construções possuem.

É frequente encontrar construções em terra compactada reparadas com argamassas hidráulicas, nomeadamente à base de cimento, na tentativa de combater a degradação. Porém estas argamassas acabam por trazer problemas adicionais [4]. Regra geral, as argamassas de cimento são demasiado rígidas e demasiado impermeáveis ao vapor, comparativamente a estes suportes. É importante escolher argamassas com propriedades semelhantes à alvenaria na qual vai ser aplicada. Assim as argamassas devem possuir uma boa compatibilidade mecânica, física e química com o suporte. Todavia, nem sempre os vários requisitos exigidos às argamassas são fáceis de atingir e harmonizar.

Em Portugal a terra foi muitas vezes misturada com cal aérea para formular argamassas mistas de terra e cal. Este tipo de argamassas era aplicado em construções em terra, nomeadamente em paredes de taipa, em alvenaria de adobe e em paredes de tabique. Actualmente no nosso país existe um crescente interesse sobre construções em terra. Por exemplo no Alentejo, para além do vasto património edificado vernacular e monumental construído em terra, existe também um elevado número de construções recentes feitas com paredes de terra - não só de habitações familiares, mas também em edificações relacionadas com o turismo.

O tipo de minerais de argila presentes na terra altera, por exemplo, as características das argamassas. Porque cada terra é um caso, as suas características são muito variáveis. Para tornar a terra um material de construção mais corrente, por exemplo para uso em argamassas mistas, é necessário tipificar as características que se podem obter ao introduzir este material na formulação de argamassas de cal.

Existe muita informação relevante sobre argamassas de cal aérea [5,6], contudo existem poucos estudos sobre argamassas de terra [7,8,9,10,11]. É notória a escassa informação sobre argamassas mistas de cal aérea e terra [12,13]. Contudo, não só as características mecânicas e físicas são relevantes, mas também as características químicas e mineralógicas. Neste artigo apresenta-se a caracterização mineralógica e granulométrica de uma terra utilizada em argamassas, assim como a caracterização mecânica e mineralógica de argamassas formuladas com substituições crescentes de cal aérea por essa terra. A análise é efetuada considerando a argamassa de cal aérea como padrão.

2. MATERIAIS E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

No presente artigo caracterizam-se argamassas de cal aérea e terra argilosa aos 90 dias de idade de cura. Partindo de uma argamassa de referência com um traço volumétrico de 1:2 (cal aérea: areia), procedeu-se à substituição parcial de massa da cal por uma terra argilosa, nas proporções de 10%, 25% e 50%.

2.1 Materiais

Em todas as argamassas foi utilizada a cal aérea hidratada em pó LUSICAL H100. De acordo com a norma NP EN 459-1 [14] trata-se de uma cal cálcica CL90. Na tabela 1 apresenta-se a composição química da cal aérea, constatando-se que os compostos CaO (óxido de cálcio) e MgO (óxido de magnésio) representam 99,7% do total.

Tabela 1. Composição química de cal aérea (% de massa) [5]

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF*
Cal Aérea	-	0.01	0.15	0.01	3.907	76.74	-	0.02	0.04	0.01	0.45

*Perda ao Fogo

O agregado usado na produção das argamassas foi uma mistura de areias siliciosas lavadas com granulometria distinta. A terra utilizada (figura 1) foi disponibilizada pela empresa Sorgila - Sociedade de Argilas e é proveniente da zona de Rendinha (Pombal) e já tinha sido utilizada em trabalhos de investigação anteriores sobre argamassas de terra [15]. A selecção da terra baseou-se em, de entre várias terras argilosas disponíveis, conter argila de baixa expansibilidade, uma elevada percentagem de finos e retracção linear baixa. Na Figura 2 apresenta-se a curva granulométrica da mistura de areias e da terra argilosa utilizadas, determinadas a partir do ensaio de peneiração a seco. Na mesma figura surge ainda a curva granulométrica resultante da peneiração por via húmida realizada à terra argilosa. Na tabela 2 apresenta-se a baridade de todos os constituintes da argamassa.



Figura 0.1. Aspeto da terra argilosa

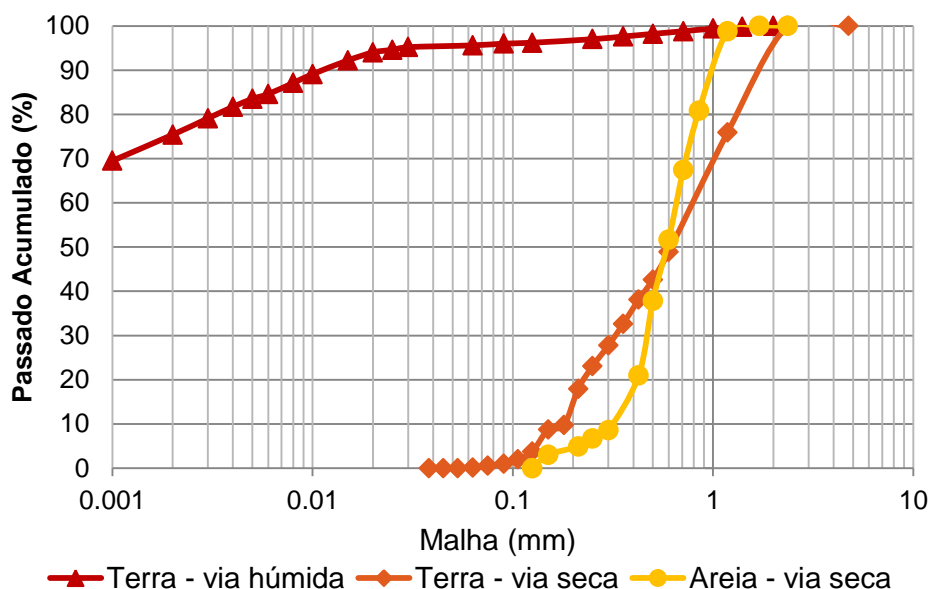


Figura 0.2. Curvas granulométricas da areia resultante da mistura e da terra, esta determinada por via seca mas também por via húmida (com base em [16])

Tabela 2. Baridade dos materiais constituintes das argamassas

Material	Baridade [g/cm ³]
Cal aérea	0.362
Mistura de areias	1.463
Terra argilosa	1.09

2.2 Argamassas, Provetes e Condições de Cura

Através da baridade, do traço e das percentagens de substituição pretendidas, os constituintes secos das argamassas foram pesados e misturados manualmente, e foram colocados na cuba da amassadora mecânica de laboratório; a amassadora foi colocada em funcionamento e, durante os primeiros segundos, foi adicionada a quantidade de água considerada necessária para as argamassas apresentarem boa trabalhabilidade (que tinha sido previamente definida). A amassadura

mecânica prolongou-se durante 3 minutos, com uma interrupção para que o material dos bordos fosse bem integrado. Avaliou-se a consistência de cada argamassa através do ensaio da mesa de espalhamento, realizado de acordo com a EN 1015-3 [17]. Com cada tipo de argamassa foram realizados provetes prismáticos de dimensões de 4x4x16 [cm] em moldes metálicos padronizados, que foram dispostos numa sala com condições de humidade relativa (HR) e temperatura (T) de $65\pm 5\%$ e $20\pm 3^\circ\text{C}$. Do 2º ao 5º dia, a superfície livre dos provetes foi aspergida diariamente com água potável. Os provetes foram desmoldados ao fim de uma semana e mantidos na sala de cura até completarem 90 dias.

Para diferenciar as argamassas de uma forma explícita escolheu-se uma nomenclatura que identifica o traço volumétrico e a percentagem de terra incorporada em substituição da massa de cal aérea de cada argamassa, e que é expressa na Tabela 3.

A designação CL2 designa a argamassa de referência com traço volumétrico 1:2, enquanto a designação CL2_10t, por exemplo, designa a argamassa de cal aérea (CL) com traço volumétrico 1:2 (ligante: areia), em que 10% de massa de cal foi substituída por terra argilosa. Na Tabela 3 apresenta-se a composição, em traços volumétrico e em massa, assim como a razão mássica água/ligante (considerando este constituído pelo conjunto cal e terra) de cada argamassa e a correspondente consistência por espalhamento.

Tabela 3. Identificação dos provetes, composição e consistência por espalhamento

Designação dos Provetes	Cal aérea: Terra: Areia		Razão Água/(CL+terra) [-]	Espalhamento [mm]
	Traço Volumétrico	Traço em Massa		
CL2	1:2	1:0,7,7	1.7	147
CL2_10t	1:0,04:2,2	1:0,1:8,6	1.8	152
CL2_25t	1:0,1:2,7	1:0,3:10,3	1.8	147
CL2_50t	1:0,3:4	1:1:15,5	1.8	146

Verifica-se que a quantidade de água introduzida nas argamassas aumentou ligeiramente com a substituição de cal por terra, comparativamente à argamassa de referência, mas não foi necessário mais nenhum acréscimo de água com o aumento da percentagem de terra introduzida. A trabalhabilidade obtida foi comparável no sentido que a consistência se manteve na ordem dos 149 ± 3 mm para todas as argamassas.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES E DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS

Aos 90 dias de idade de cura, os provetes foram retirados da sala climatizada e caracterizados através de ensaios mecânicos. Os provetes resultantes foram secos em estufa e acondicionados em sacos de polietileno vedados, de modo a interromper-se a cura, até serem sujeitos a ensaios químicos e mineralógicos.

3.1 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos, que incluíram ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão, foram realizados com base na norma EN 1015-11 [17], utilizando uma máquina de tração universal Zwick Rowell Z050. No ensaio de resistência à tração por flexão através de três pontos foi utilizada uma célula de carga de 2 kN. O mesmo equipamento mas com um dispositivo de compressão e uma célula de carga de 50 kN foi utilizado para a determinação da resistência à compressão. Para este ensaio foram usadas as metades dos provetes resultantes do ensaio de tração. Amostras resultantes da compressão foram secas em estufa e acondicionadas dentro de sacos de polietileno, por forma a interromper a cura. Foram encaminhadas para os restantes ensaios.

3.2 Análise mineralógica por difração por raios X (DRX)

A cal aérea e a terra utilizadas nas argamassas foram analisadas por DRX. A cal aérea já tinha sido analisada em estudos anteriores [5]. A amostra de terra fragmentada foi esquartejada com o objectivo de abranger toda a granulometria da amostra. Seguidamente foi seca até massa constante e peneirada num peneiro de malha 106 μm até que todas as partículas passassem no peneiro.

No caso das argamassas em vez foi necessário desagregar e moer a amostra, incluindo os grãos de areia, de modo a garantir que todas as partículas passavam no peneiro de malha 106 μm . Deste modo obtém-se a amostra global. Os difractogramas de raios X foram obtidos através de um difractómetro de raios X Philips PW 3710 com 35 kV e 45 mA, utilizando radiação X com comprimento de onda λ de 1.7903 Å.

3.3 Análise termogravimétrica e térmica diferencial (ATG/DTG)

As amostras para serem analisadas por ATG-DTG foram secas e desagregadas, de forma idêntica à que foi descrita para o ensaio de DRX. Uma amostra de cada argamassa foi então moída (incluindo os respetivos grãos de areia) até que todas as partículas passassem no peneiro com malha 106 μm . Foi utilizada uma termobalança SETARAM TGA 92 com atmosfera inerte de argon e velocidade de aquecimento de 10°C/min desde a temperatura ambiente até aos 1000°C [18].

4. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios das resistências mecânicas (em termos de valor médio e desvio-padrão) podem observar-se no gráfico de barras da Figura 3.

São de salientar os reduzidos desvios-padrão obtidos. Como se observa, tanto a resistência à compressão como a resistência tração aumentam ligeiramente com a substituição de 10% de cal aérea por terra e diminuem para percentagens maiores de substituição. Assim, a argamassa com 50% de terra (CL2_50t) apresenta os menores valores de resistências mecânicas.

Na Figura 4 observam-se os difratogramas da terra argilosa e da cal aérea. Pela análise do registo difratométrico da terra constata-se que o mineral de argila predominante é a caulinite. Com efeito, a terra, em conformidade com o mineral de argila predominante, pode ser designada como uma terra caulinítica. O difractograma da cal aérea comprova que o constituinte principal da cal é a portlandite, seguindo-se a calcite. Esta última denota já uma pequena percentagem de carbonatação da cal aérea que foi utilizada na formulação das argamassas.

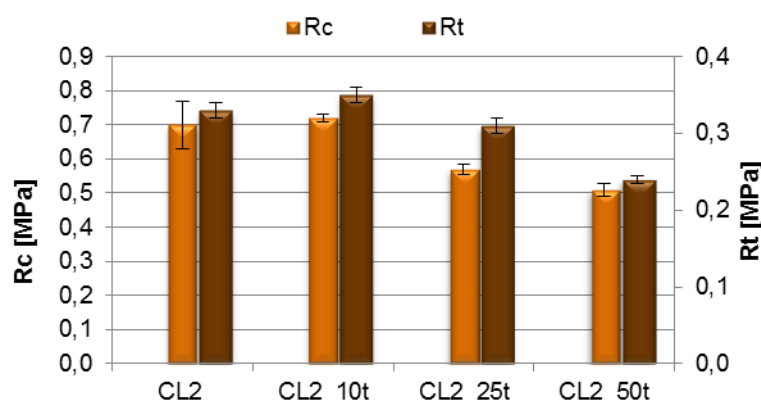


Figura 3. Valores médios e desvio-padrão da resistência à compressão (Rc) e resistência à tração (Rt) das argamassas com 90 dias.

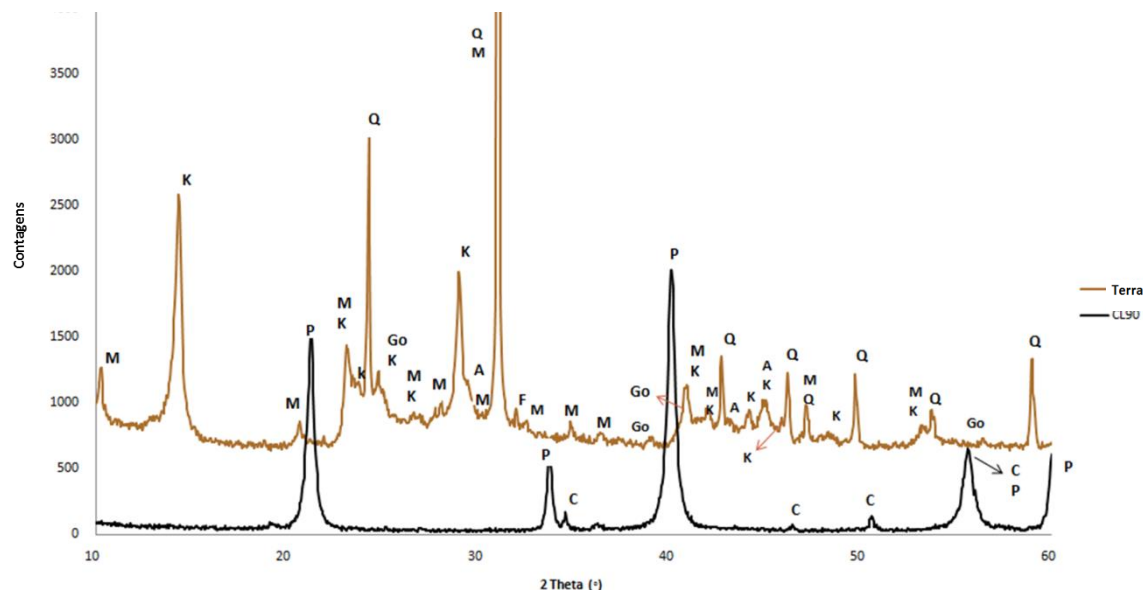


Figura 4. Difractograma da terra argilosa e da cal aérea. Notação: C-Caulinite; P-Portlandite; M- Mica; K- Caulinite; F- Feldspatos; A – Anatase; Go-Goetite

Na Figura 5 observam-se os difractogramas das argamassas analisadas. De acordo com o resultado da análise por DRX das argamassas é possível observar, como esperado, um aumento do pico da caulinite nas argamassas com maior percentagem de terra, em oposição à diminuição da portlandite com a substituição por terra. É possível ainda constatar que não houve qualquer formação de compostos devido à reacção entre os minerais de argila da terra e a cal.

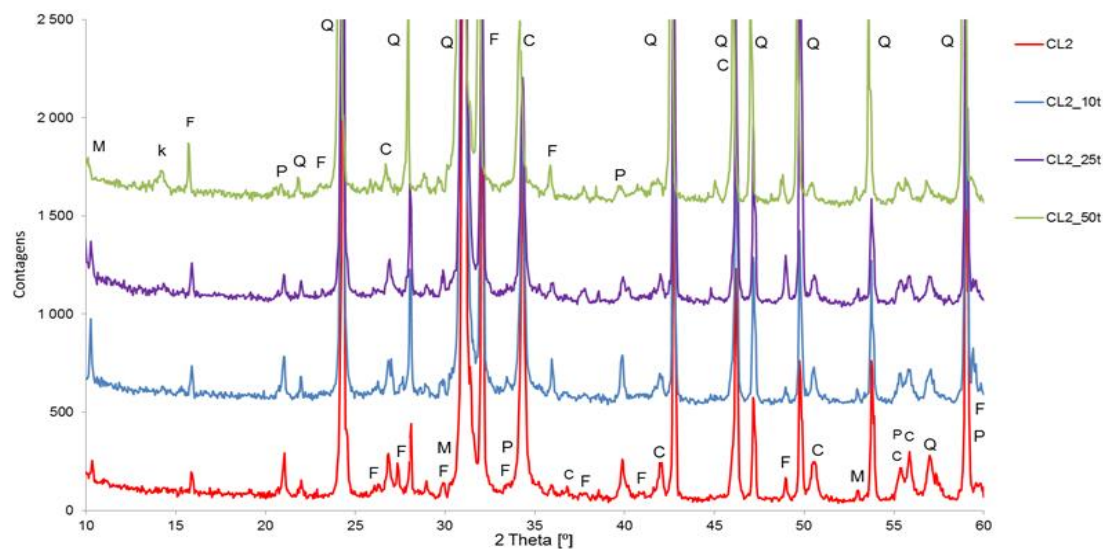


Figura 5. Difratogramas das argamassas CL2, CL2_10t, CL2_25t e CL2_50t. Notação: C-Calcite; P-Portlandite; M-Mica; K- Caulinite; F-Feldspatos; Q-Quartzo

Na Figura 6 apresentam-se as curvas resultantes da análise térmica diferencial (DTG) das matérias-primas das argamassas - da terra e da cal aérea.

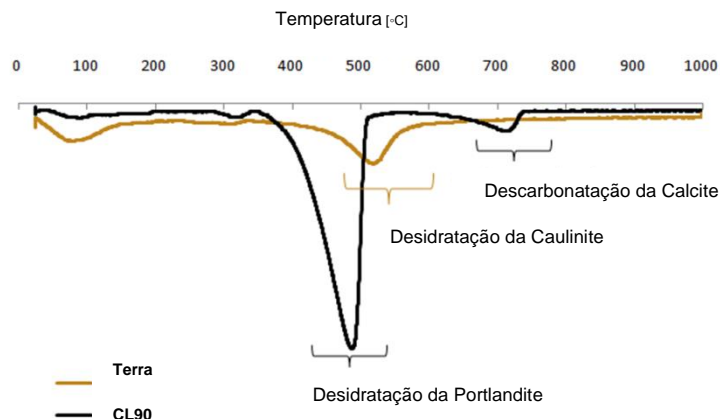


Figura 6. Curvas DTG da terra e da cal aérea.

As duas curvas mostram duas gamas de temperaturas onde ocorrem perdas de massa características da decomposição térmica dos compostos hidratados e carbonatados presentes das matérias-primas. Com base na composição DRX essas perdas de massa correspondem a:

- 350°C-550°C - Zona de perda de massa devido à desidratação da portlandite da cal e da caulinite da terra;
- 550°C-850°C - Zona de perda de massa devido à descarbonatação da calcite.

Na figura 7 apresentam-se as curvas resultantes da DTG das argamassas.

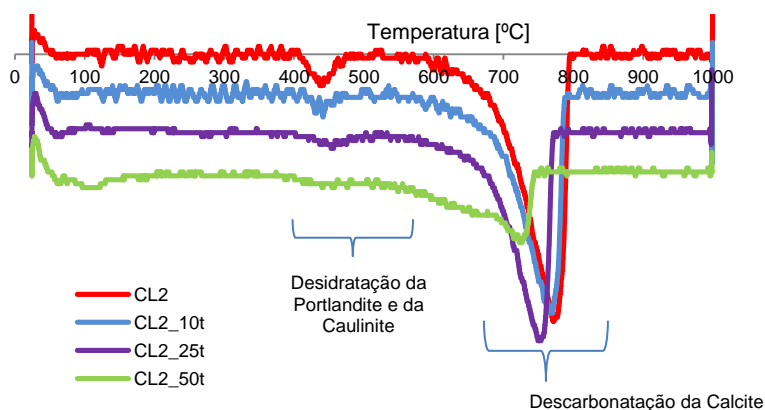


Figura 7. Curvas DTG das argamassas em análise

As curvas DTG da figura 7 apresentam picos nas zonas correspondentes às perdas de massa das correspondentes matérias-primas das argamassas. Assim, as curvas obtidas são coerentes, na medida em que quanto maior a percentagem de terra introduzida em substituição da massa de cal, menor é o pico correspondente à descarbonatação da calcite.

5. DISCUSSÃO

As argamassas analisadas apresentaram um valor mínimo de resistência à flexão de 0.24 MPa e de resistência à compressão de 0.51 MPa, quando se atingiu uma substituição de cal por terra de 50%. Contudo, verifica-se que mesmo esta argamassa de menores resistências mecânicas cumpre os requisitos mecânicos mínimos definidos por Veiga *et al.* [5] para argamassas de substituição para edifícios antigos ou com paredes com resistências mecânicas comparáveis, como sejam por exemplo o caso de paredes de terra. Com efeito, todas as argamassas analisadas apresentam resistências à flexão aos 90 dias entre 0,2-0,7 N/mm² e à compressão entre 0,4-2,5 N/mm², o que indicia a sua adequação para aplicação em rebocos exteriores e interiores.

Comparando os resultados com argamassas com base em cal aérea mas em que a cal foi parcialmente substituída por resíduo fino de materiais cerâmicos, proveniente de tijolo, telhas e vasos, nas percentagens de 10% e 20% [19], verifica-se que o acréscimo ocorrido com a substituição de 10% de cal por terra argilosa é de algum modo semelhante, embora mais fraco.

Tal situação deve-se ao facto do material cerâmico fino cozido apresentar geralmente alguma reatividade pozolânica e reagir com a cal aérea [20] o que não acontece, como se comprovou no presente estudo, entre a cal aérea e a terra crua.

Devido a essa situação, admite-se que o aumento de resistências mecânicas ocorrido entre a argamassa padrão e a com 10% de terra possa ser devido a uma alteração microestrutural da argamassa, que ainda irá ser averiguada. Com efeito, tendo-se efetuado uma substituição em massa de cal aérea por terra, e apresentando a terra uma baridade (no estado seco e apenas após destorroamento) muito superior à da cal, isto significa que, na substituição, um determinado volume de cal foi substituído por um volume muito inferior de terra. Desta situação pode colocar-se como hipótese o facto de, numa substituição em volume em vez de em massa, os resultados poderem ainda vir a ser otimizados.

6. CONCLUSÕES

Os resultados da DRX mostram que a terra incorporada nas argamassas é uma terra caulinitica, uma vez que o mineral de argila presente é maioritariamente a caulinite. Para além disto verifica-se que os resultados da DRX das argamassas são coerentes com as matérias-primas utilizadas. Existe um crescimento do pico da caulinite com o aumento da percentagem de substituição de cal por terra e, de forma semelhante, a diminuição da portlandite. Até à idade de 90 dias não houve formação de compostos devido a qualquer reacção da cal aérea com a terra crua.

Na argamassa com 10% de terra observaram-se resultados muito satisfatórios, uma vez que houve um ligeiro aumento da resistência mecânica, comparativamente à argamassa padrão, só de cal aérea. Nas argamassas com percentagem de terra superior a 10% verificou-se uma diminuição da resistência à tração e à compressão relativamente à argamassa de referência, só de cal. Todavia, este resultado era esperado, porque efetivamente substitui-se um ligante (cal aérea) por terra argilosa. Salienta-se, no entanto e de acordo com os requisitos estabelecidos por Veiga *et al.* [5], o facto desta diminuição de resistência não comprometer o uso destas argamassas em rebocos de substituição para edifícios antigos. Efetivamente considera-se que argamassas mistas de cal aérea e terra poderão ser muito eficientes para aplicação na conservação e reabilitação de edifícios antigos, assim como de edifícios com paredes de terra. Particularmente neste último tipo de edifícios serão até uma solução eficiente para construção nova.

As argamassas mistas de cal e terra possuem menor energia incorporada que argamassas só de cal aérea, que já de si são mais sustentáveis que muitas outras argamassas. Com efeito, um ligante que necessita de ser produzido com consumo de energia para calcinação e de água para a sua extinção, e que tem de ser transportado desde a fábrica, pode ser parcialmente substituído por terra, que pode ser obtida localmente e que apenas necessita de um destorroamento para ser utilizada. Assim, e corroborando a prática tradicional, o uso da terra como constituinte parcial de argamassas de cal aérea mostra ser uma medida que tecnicamente pode ser eficiente, para além de constituir uma medida mais ecológica.

Estas argamassas indiciam, assim, ser ecoeficientes, o que justifica a continuidade do seu estudo, com vista a uma mais aprofundada caracterização e otimização de potenciais formulações.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Lusical pela disponibilização da cal aérea H100, à Doutora Idália Gomes e à Sorgila pela disponibilização da terra argilosa e à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio atribuído à segunda autora através do projecto EXPL/ECM-COM/0928/2012.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Bruno, P. Faria, A. Candeias, J. Mirão, "Earth mortars use on pre-historic habitat structures in south Portugal. Case studies", *Journal of Iberian Archaeology*, vol.13, pp. 51-67, 2010.
- [2] M. Fernandes, "Interventions in Portuguese rammed earth architecture - from ignorance to good practices", *Rammed Earth Conservation*, 2012, pp. 309-314.
- [3] A. Balderrama, "The Conservation of Earthen Architecture", *The Getty Conservation Institute Newsletter*, vol. 16, pp 4-16, 2001.
- [4] I.Gomes, P. Faria, "Repair mortars for rammed earth constructions", in *XII DBMC - 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, vol.2, pp. 689-696, 2011.
- [5] M. R. Veiga, A. Fragata, A. L. Velosa, A.C. Magalhães, G. Margalha, "Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings", *International Journal of Architectural Heritage*, vol.4, pp. 177-195, 2010.
- [6] P. Faria; F. Henriques, V. Rato, "Comparative evaluation of aerial lime mortars for architectural conservation", *J. Cultural Heritage*, vol.9, pp.338-346, 2008.
- [7] M.I. Gomes, T. D. Gonçalves, P. Faria, "Evaluación de la influencia del contenido de agua en la trabajabilidad del mortero de tierra", *Journal of Cultural Heritage Studies*, vol. 25, pp. 258-277, 2012.
- [8] M.I. Gomes, T. D. Gonçalves, P. Faria, "Earth-based repair mortars: experimental analysis with different binders and natural fibers", *Rammed Earth Conservation*, 2012, pp. 661-668.
- [9] P. Faria, T. Santos, V. Silva, "Earth-based mortars for masonry plastering", in *9th International Masonry Conference*, 7-9 July 2014 (aceite para publicação).
- [10] P. Faria, T. Santos, V. Silva, "A Portuguese premixed earth-based mortar for eco-efficient plasters", in *International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture*, Valencia, 11-13 September 2014 (aceite para publicação).
- [11] E. Hamard, J. Morel, F. Salgado, A. Marcom, N. Meunier, "A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture", *Journal of Cultural Heritage*, vol.14, pp. 109-115, 2013.
- [12] P. Faria, V. Silva, N. JAMU, I. Dias, I. GOMES, "Evaluation of air lime and clayish earth mortars for earthen wall renders", *Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development*, 2013, , pp. 407-413.
- [13] P. Faria, I. Dias, N. Jamú, V. Silva, "Air lime-earth blended mortars - Assessment on fresh state and workability", in *International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture*, Valencia, 11-13 September 2014 (aceite para publicação).
- [14] IPQ, *NP EN 459-1: 2011 – Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Caparica.
- [15] I. Gomes, "Conservação de construções em taipa: argamassas de reparação", *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*, Universidade Nova de Lisboa, 2013.

- [16] M. I. Gomes, T. D. Gonçalves, P. Faria, "Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais", in *4º Congresso Português de Argamassas e ETICS*; Universidade de Coimbra, 2012 (CD).
- [17] CEN, *EN 1015-11: 1999* – Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels.
- [18] A. Santos Silva, "Degradação do betão por reações álcalis-silica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção". *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil*, Universidade do Minho, 2005.
- [19] G. Matias, I. Torres, P. Faria, "Argamassas de reabilitação com resíduos de cerâmica", in *Congreso Latinoamericano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio*, pp. 1480-1487, 2014.
- [20] A. E. Charola, P. Faria-Rodrigues, A. R. Mcghie, F.M.A Henriques, "Pozzolanitic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure", *Int. J. for Restoration of Buildings and Monuments*, vol.11, pp.111-118, 2005.